



PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROJETO DE UM DISPOSITIVO MITIGADOR DE CATENÁRIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Por,
William Cartesius Cipriano Pontes

Brasília, 18 de julho de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROJETO DE UM DISPOSITIVO MITIGADOR DE CATENÁRIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

POR,

William Cartesius Cipriano Pontes

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM (Orientador)

Prof.^a Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM (Co-
Orientadora)

Prof.^a José Maurício Motta, UnB/ ENM

Brasília, 18 de julho de 2013.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me abençoa em cada escolha que faço.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente e sempre me deram força e palavras de incentivo.

Agradeço à minha namorada, Renayra, pela paciência, carinho, pelos momentos de descontração e principalmente pela amizade.

Agradeço ao meu tio, Danúsio, por ter incentivado minha vinda à UnB, dando todo o apoio possível durante minha graduação, e pelas boas discussões e histórias.

Agradeço também aos professores Edson Paulo da Silva e Dianne Magalhães Viana, orientadores deste projeto, pelo apoio, colaboração e disponibilidade.

RESUMO

As Ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy* – SMA) é um grupo de ligas metálicas que apresenta a capacidade de retomar sua forma ou tamanho original mediante determinadas variações térmicas ou de carregamento. Esses materiais podem sofrer deformação de até 10% em algumas ligas e retomar sua configuração inicial através do aquecimento (efeito memória de forma) ou retirada de carga (pseudoelasticidade).

As SMA se inserem neste projeto em função da necessidade de redução de flechas excessivas em linhas de transmissão de energia elétrica, devido a variações de temperatura, que por questões de segurança devem atender algumas normas estabelecidas. Este trabalho tem por objetivo projetar um dispositivo mitigador de catenária capaz de, a partir das características termomecânicas das SMA, retracionar os cabos condutores em função do aumento da temperatura, sanando assim o problema da flecha excessiva em linhas de transmissão de energia elétrica.

Através da concepção do SLiM e das equações de linhas de transmissão(LT), tem-se o propósito de desenvolver um modelo que apresente a funcionalidade e eficiência do dispositivo quando submetido a situações típicas de operação em linhas de transmissão.

ABSTRACT

The shape memory alloys is a group of alloys which has the ability to resume its original shape or size under certain variations or thermal loading. These materials can undergo deformation which can reach 10% in some alloys and resume its original configuration by heating (shape memory effect) or removal of cargo(pseudoelasticity).

The SMA fall in this project due to the need to reduce excessive arrows in transmission lines of electricity, which can be caused by temperature variations, which for safety reasons should meet certain standards. This work aims to design a device mitigator arrow (SLiM) can, as of thermomechanical characteristics of SMA, restress cables conductors as a function of increasing temperature, thus remedying the problem of excessive arrow lines transmission of electricity.

Through the design of the slim and the equations of transmission lines, has the purpose of developing a model that presents the functionality and efficiency of the device when subjected to typical operating conditions in transmission lines.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.3 METODOLOGIA.....	12
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA(SMA)	13
2.2 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMA.	14
2.3 PROJETO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
2.3.1 CÁLCULO DE FLECHA	17
2.3.2 ALTURA DE SEGURANÇA	18
2.3.3 CÁLCULO DE COMPRIMENTO DO CABO CONDUTOR.....	18
2.3.4 EFEITOS DA VARIAÇÃO TÉRMICA.....	19
2.4 CARGA DE PRÉ-ESTICAMENTO (Every Day Stress - EDS).....	20
2.5 FLECHA EXCESSIVA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	21
3 PRÉ-PROJETO DO DISPOSITIVO	23
3.1 CONCEPÇÃO DO SLiM	23
3.2 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE FLECHA.....	26
3.3 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO SLiM.....	27
3.4 RELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO EFETIVO DO SLiM E A DEFORMAÇÃO DO SMA.....	29
3.5 QUANTIDADE DE FIOS DE SMA NO ATUADOR.....	30
3.6 AÇÃO EFETIVA E DIMENSIONAMENTO DO SLiM	31
3.7 CASO ESPECÍFICO	33
4 PROJETO	37
4.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	37
4.2 MATERIAIS DO DISPOSITIVO.....	41
5 ANÁLISES E RESULTADOS	42
6 CONCLUSÕES.....	60
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA ATIVIDADES FUTURAS	60
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
8 ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva fração volumétrica de martensita(ξ) X temperatura(T)

Figura 2.2 – Curva quasiplástica esquemática

Figura 2.3 – Curva pseudoelástica esquemática

Figura 2.4 – Curva tensão-deformação-temperatura

Figura 2.5–Representação de um vão em linha de transmissão...

Figura2.6 – Forças atuantes no cabo

Figura 2.7 – Aumento da flecha em função da variação de temperatura

Figura3.1 – SLiM – Sagging Line Mitigator

Figura 3.2 – Braço de alavanca

Figura 3.3 – Representação simplificada do SLiM

Figura 3.4 – Conjunto de fios de SMA

Figura 3.6 – Deformação de um fio de SMA devido à variação de temperatura

Figura 3.7 – Configuração do SLiM em funcionamento

Figura 3.8 – Representação esquemática do dispositivo aberto (LF)

Figura 3.9 – Representação esquemática do dispositivo fechado(LQ)

Figura 3.10 – Configuração do SLiM em funcionamento

Figura 4.1 – Dispositivo mitigador de flecha baseado na concepção do SLiM

Figura 4.2 – Atuador(feixe de fios de SMA)

Figura 4.3 – Olhal

Figura 4.4 – Braçadeira

Figura 4.5 – Carcaça

Figura 4.6 – Braço de alavanca

Figura 5.1 – Dados do braço de alavanca

Figura 5.2 – Campo de tensões atuantes no braço de alavanca.

Figura 5.3 – Fator de segurança das tensões atuantes no braço de alavanca.

Figura 5.4 – Campo de deslocamento em função das tensões atuantes no braço de alavanca.

Figura 5.5 – Campo de deformação em função das tensões atuantes no braço de alavanca

Figura 5.6 – Dados da carcaça – perfil retangular

Figura 5.7 – Campo de tensões atuantes na carcaça

Figura 5.8 – Fator de segurança atuantes na carcaça

Figura 5.9 – Campo de deslocamento da carcaça.

Figura 5.10 – Campo de deformação da carcaça.

Figura 5.11 – Dados da carcaça – tubular

Figura 5.12 – Campo de tensões atuantes na carcaça tubular

Figura 5.13 –Fator de segurança atuante na carcaça tubular

Figura 5.14 – Campo de deslocamento da carcaça tubular.

Figura 5.15 – Campo de deformação da carcaça tubular.

Figura 5.16 – Dados da carcaça – AÇO INOX

Figura 5.17 – Campo de tensões atuantes na carcaça

Figura 5.18 – Fator de segurança atuantes na carcaça

Figura 5.19 – Campo de deslocamento da carcaça.

Figura 5.20 – Campo de deformação da carcaça.

Figura 5.22 – Campo de tensões atuantes no suporte da carcaça

Figura 5.23 –Fator de segurança atuante no suporte da carcaça

Figura 5.24 – Campo de deslocamento do suporte da carcaça

Figura 5.25 – Campo de deformação do suporte da carcaça

Figura 5.26 – Dados do pino de fixação da base do braço de alavanca

Figura 5.27 –Dados do pino de fixação intermediário do braço de alavanca

Figura 5.28 – Análise do pino de fixação superior do braço de alavanca

Figura 5.29 – Campo de tensões atuantes no pino da base do braço de alavanca

Figura 5.30 –Fator de segurança do pino da base do braço de alavanca

Figura 5.31 – Campo de tensões atuantes no pino intermediário do braço de alavanca

Figura 5.32 – Fator de segurança do pino intermediário do braço de alavanca

Figura 5.33 – Campo de tensões atuantes no pino superior do braço de alavanca

Figura 5.34 – Fator de segurança atuante no pino superior do braço de alavanca

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

M_S	<i>Martensite start</i> – Temperatura e inicial de formação da martensita	[°C]
M_f	<i>Martensite finish</i> – Temperatura final de formação da martensita	[°C]
A_s	<i>Austenita start</i> – Temperatura inicial de formação da austenita	[°C]
A_f	<i>Austenita finish</i> – Temperatura final de formação da austenita	[°C]
D_A	Módulo de elasticidade da austenita	[N/m ²]
D_M	Módulo de elasticidade da martensita	[N/m ²]
L_F	Comprimento do fio de SMA no estado frio	[m]
L_Q	Comprimento do fio de SMA no estado quente	[m]
D_0	Deformação residual	[mm]
D	Módulo de elasticidade	[N/m ²]
A	Distância básica	[m]
U	Tensão máxima de operação da linha	[kV]
D_U	Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação	[m]
V_L	Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de crista	[m]
P_U	Valor de sobretensão de manobra	[kV]
b	Fator de correção para condições atmosféricas diferentes das normais	
n	Coefficiente de segurança	
k	Fator de forma	
a	Vão	[m]
f	Flecha	[m]
h	Altura de segurança	[m]
y	Posição vertical	[m]
x	Posição horizontal	[m]
C	Parâmetro de catenária	[m]
c	Comprimento do braço de alavanca do SLIM	[m]
r	Comprimento da carcaça do dispositivo	[m]
F_x	Componente horizontal da força axial	[N]
F_y	Componente vertical da força axial	[N]
p	Peso unitário do cabo	[N/m]
S	Seção do condutor	[mm ²]
T	Temperatura	[°C]
H	Altura de suspensão	[m]

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de expansão linear	[1/°C]
α_t	Coefficiente de dilatação térmica	[1/°C]
ζ	Fração volumétrica de martensita	[%]
ζ_T	Fração volumétrica de martensita formada por temperatura	[%]
ζ_S	Fração volumétrica de martensita formada por tensão	[%]
τ	Coefficiente de expansão térmica	[MPa/°C]
γ	Inclinação do braço de alavanca	[rad]
ϵ_{SMA}	Deformação do fio de SMA	[%]

Sobrescritos

- Variação temporal
- Cr Crítico

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DAMiF	Dispositivo Adaptativo Mitigador de Flecha
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
LT	Linha de Transmissão
EDS	<i>Every Day Stress</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
SLiM	<i>Sagging Line Mitigator</i>
CCC	Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O Brasil tem um dos maiores sistemas de transmissão de energia do mundo, totalizando aproximadamente 102 mil quilômetros de linhas (SANTO ANTONIO ENERGIA S/A, 2009). Parte significativa deste sistema está em operação há décadas e como essas linhas são projetadas para carregamentos previamente determinados, altas variações térmicas e/ou mecânicas podem gerar problemas onerosos. A variação de temperatura, seja por efeito Joule ou pela temperatura ambiente, que o cabo condutor pode sofrer em operação, pode ultrapassar valores que levam a flechas excessivas que infringem distâncias mínimas estabelecidas por normas de segurança. A NBR5422(1985) fixa as condições básicas para o projeto em linhas de transmissão. Algumas das mais necessárias neste projeto são, especificamente, a determinação distância de segurança entre condutor e solo, a flecha do condutor na condição de trabalho de maior duração, bem como as temperaturas máxima e mínima de operação. A ocorrência de flecha excessiva em função de altas temperaturas do condutor limita a ampacidade da linha e ainda representa risco de eletrocussão de pessoas e veículos podendo levar à interrupção do fornecimento e causar queimadas destrutivas. Sendo assim, o custo gerado pela flecha excessiva em termos de energia não vendida, poda de árvores e despesas com acidentes podem ser muito relevantes.

Para reduzir a flecha excessiva a níveis recomendados, diversas ações podem ser, em princípio, empreendidas: diminuir o tamanho dos vãos, retracionar o cabo condutor, aumentar a altura das torres, diminuir a carga nas LT. Retracionar, portanto, parece, dentre as apresentadas, ser a melhor das alternativas. Visualizando essa questão a *Material Integrity Solution Inc.*, empresa estado-unidense, desenvolveu o SLiM (*Sagging Line Mitigator*), um dispositivo capaz de responder às variações térmicas dos cabos condutores e através do efeito memória de forma retracioná-los conservando a distância mínima de segurança, e resolvendo assim o problema da flecha excessiva (DA SILVA, 2003).

Através do modelo matemático desenvolvido por DA SILVA (2012), pode-se quantificar sua efetividade para uma situação típica de operação em linhas de transmissão de energia elétrica.

LÜSSI (2009), apresenta uma caracterização de um protótipo do SLiM, verificando sua eficácia quando submetido a situações típicas de operação, tais como tamanho de vão, tipo de cabo e variações de temperatura atuantes no dispositivo, onde foi possível quantificar a funcionalidade do dispositivo para a situação a que foi submetido.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo projetar um protótipo de um dispositivo mitigador de flecha baseado no comportamento termomecânico das SMA partindo da concepção do dispositivo SLiM (Shirmohamadi, 2002).

1.3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto foi considerada uma situação típica de operação de linhas de transmissão, em termos de vão e tipo de cabo. A partir das equações de projeto de LT e em função das temperaturas de operação, determinam-se os valores de flecha que o cabo sofre sob essas condições, fixando um valor para flecha limite pelo condutor. A partir da concepção do SLiM, foi determinada a redução do comprimento do condutor necessária para reduzir a flecha abaixo do valor máximo estabelecido.

A partir disso determinou-se a geometria do dispositivo e, em função dos esforços aplicados no atuador e das propriedades mecânicas de uma SMA típica, calculou-se o número de fios de SMA necessários. A partir de uma análise de tensões e deformações certifica-se se o dispositivo suporta adequadamente os esforços a que está sujeito.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma (SMA), tais como seu comportamento termomecânico e os fenômenos de quasilasticidade, efeito memória de forma e pseudoelasticidade. Também são apresentadas as equações básicas de projeto de linhas de transmissão utilizadas no desenvolvimento do trabalho. O capítulo 3 apresenta a ideia do protótipo do SLiM. No capítulo 4 é apresentado o projeto de um protótipo do dispositivo baseado na concepção do SLiM. O capítulo 5 trata das análises por elementos finitos realizados e resultados obtidos para cada componente do dispositivo. A conclusão é apresentada no capítulo 6.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA(SMA)

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) são ligas metálicas que apresentam um comportamento termomecânico fortemente dependente da temperatura. Esta dependência está associada a transformações martensíticas que essas ligas sofrem em função de variações de temperatura e tensão. Dependendo da temperatura, as SMA existem, basicamente, na fase martensítica, na fase austenítica ou em uma mistura dessas duas fases (DA SILVA, 2003).

A figura 2.1 ilustra esquematicamente a evolução da fração volumétrica de martensita - ξ - em função da temperatura. As temperaturas características de transformação de fase são M_s (início de formação de martensita), M_f (final de formação de martensita), A_s (início de formação de austenita) e A_f (final de formação de austenita). Acima de A_f a fase estável é a austenita e abaixo de M_f a fase estável é a martensita. Ao ser resfriada a partir de uma temperatura superior a A_f o material atingirá uma temperatura M_s na qual inicia-se a transformação martensítica. Essa transformação completa-se na temperatura M_f . No aquecimento, a partir de uma temperatura inferior a M_f , o material atingirá a temperatura A_s na qual inicia-se a transformação reversa para a austenita. Essa transformação finaliza-se na temperatura A_f (DA SILVA, 2003).

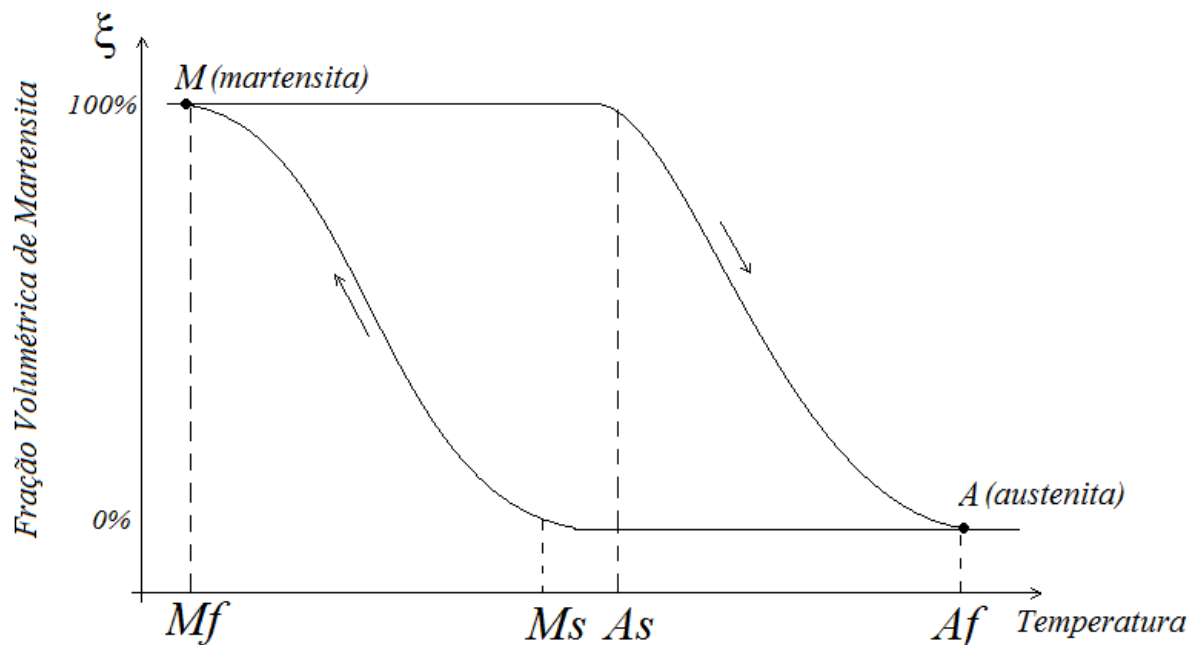


Figura 2.1 – Curva fração volumétrica de martensita (ξ) x temperatura(T) – esquemática (DA SILVA, 2003 - Modificado).

2.2 COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DAS SMA.

Abaixo de M_f , as SMA existem na fase martensítica maclada (DA SILVA, 2003). Ao ser submetido a um carregamento o material sofre uma reorientação cristalográfica gerando assim uma deformação residual na fase martensita demaclada. Essa reorientação da martensita maclada em demaclada tem como resultado uma deformação, a esse comportamento dá-se o nome de quasiplasticidade (DA SILVA, 2003). A figura 2.2 apresenta esquematicamente o este fenômeno.

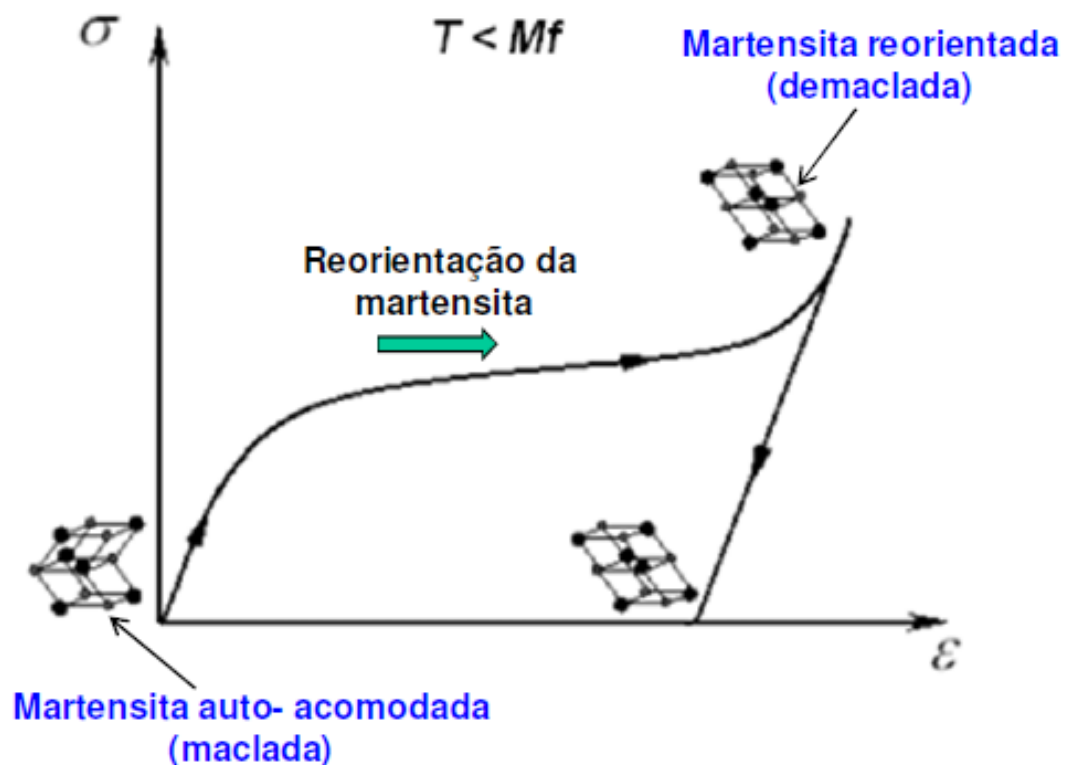


Figura 2.2 – Curva quasiplástica típica (DA SILVA, 2012).

A partir de um determinado nível de tensão o material sofre uma deformação que evolui a uma tensão praticamente constante. Essa deformação está associada a uma transformação de fase martensítica induzida por tensão (DA SILVA, 2003). No final da transformação de fase do material volta a se comportar elasticamente. Se a carga for retirada antes do material atingir o limite de escoamento, o material retorna à sua configuração original, mas por um outro caminho percorrendo uma histerese. A esse comportamento dá-se o nome de pseudoelasticidade. A figura 2.3 apresenta esquematicamente o fenômeno da pseudoelasticidade.

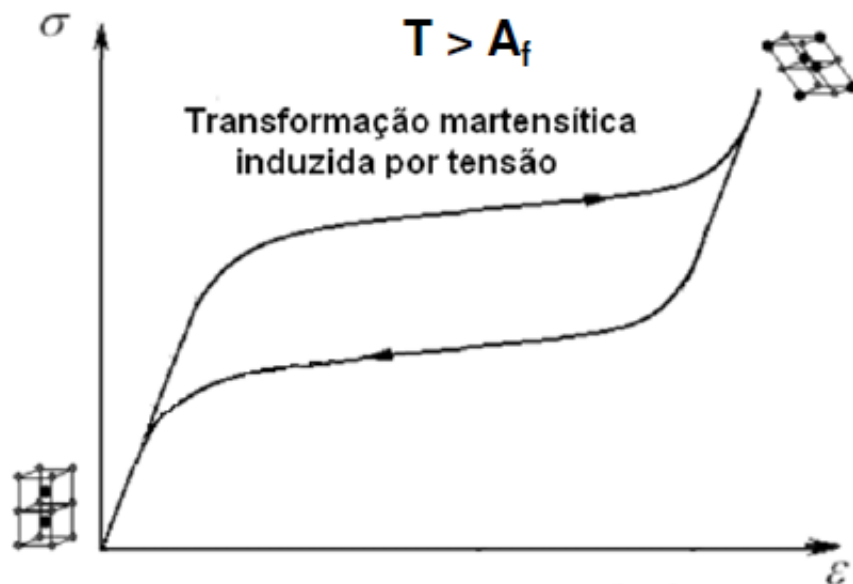


Figura 2.3 – Curva pseudoelástica típica (DA SILVA, 2003).

Se o material deformado quasiplasticamente for aquecido acima de A_f , observa-se uma recuperação da deformação quasiplástica. Esse fenômeno é denominado efeito memória de forma (DA SILVA, 2003). A figura 2.4 apresenta esquematicamente o fenômeno do efeito memória de forma.

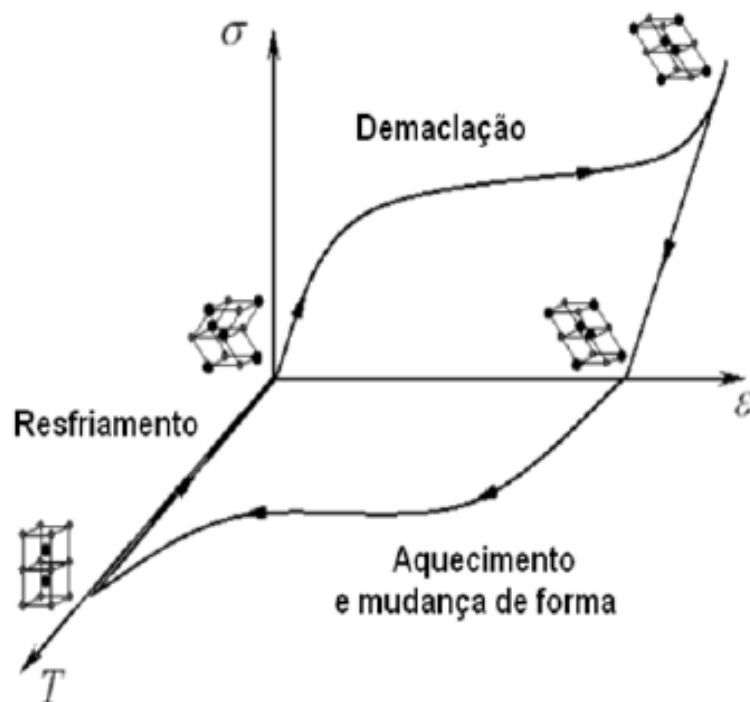


Figura 2.4 – Curva tensão-deformação-temperatura – esquemática (DA SILVA, 2003).

A figura 2.4.1 apresenta a curva deformação em função da temperatura que será explorada no funcionamento do dispositivo. Durante o aquecimento, o material percorre a curva superior. Quando a

temperatura A_s é atingida, tem-se o início da formação da austenita. A transformação continua até atingir 100% de austenita em A_f . No resfriamento o material percorre a parte inferior da curva. Para temperaturas abaixo de M_s começa a formação de martensita até atingir a temperatura M_f , quando a constituição do material é 100% martensítica (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).

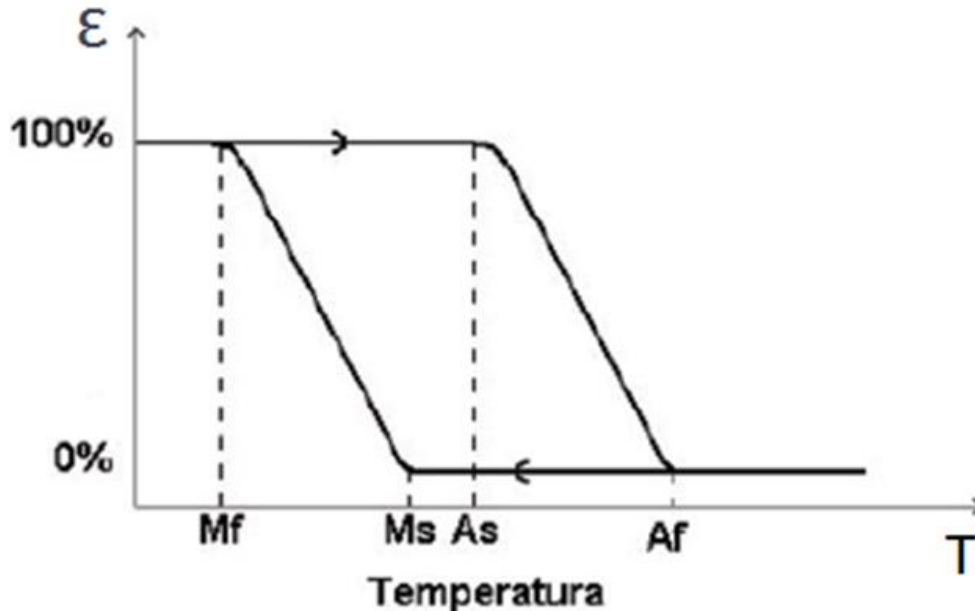


Figura 2.4.1 – Curva deformação-temperatura típica (DA SILVA, 2003)

2.3 PROJETO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O projeto de linhas de transmissão de energia elétrica é regido pela NBR5422 (1985), onde são determinados os padrões mínimos de segurança que devem ser observados. A altura das estruturas de sustentação dos cabos condutores (torre), por exemplo, dependem, dentre outros fatores, das flechas máximas dos condutores e das alturas de segurança, que devem ser respeitadas. As flechas máximas ($f_{máx}$) são determinadas em função do vão médio ao qual a torre se destina. A tração a ser usada deve ser calculada para a condição de máxima temperatura, como recomenda a NBR 5422 (FUCHS & ALMEIDA, 1982). Já a altura de segurança h , em metros, representa a menor distância admissível entre condutores e solo.

Apresentam-se aqui alguns parâmetros e equações envolvidos no projeto de uma linha de transmissão e que serão utilizados no desenvolvimento do presente projeto: distância de segurança condutor/solo, cálculo de flecha e de comprimento de cabo.

2.3.1 CÁLCULO DE FLECHA

A figura 2.5 apresenta uma configuração típica de um vão de linhas de transmissão de energia elétrica. F é a tração, dada em Newtons(N), aplicada ao cabo quando fixado na torre, essa força axial possui as componentes, horizontal F_x , que é absorvida pela estrutura e a vertical F_y , calculada pela equação 2.1, que é equilibrada pelo peso do condutor na parte central do vão a , em metros, onde, p representa o peso unitário do condutor por unidade de comprimento (N/m).

$$f = \frac{a \cdot p}{2} \quad (2.1)$$

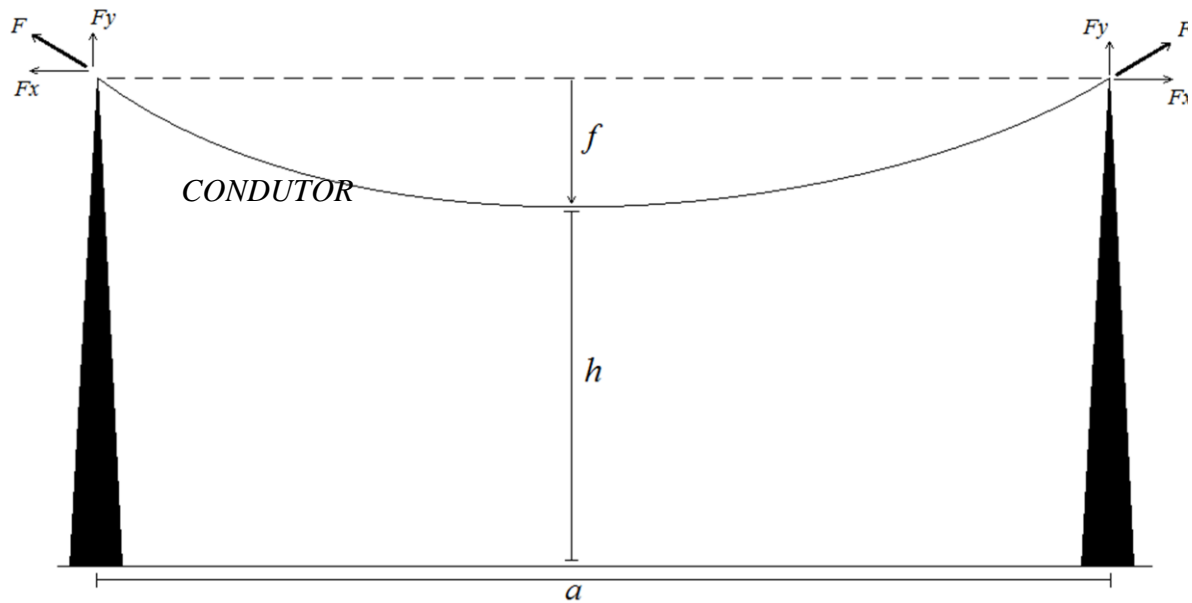


Figura 2.5–Representação de um vão em linha de transmissão (FUCHS & ALMEIDA-Modificado)

A formação da flecha, como será verificado, depende do vão a , da temperatura T e da tração F aplicada ao condutor quando fixado nas extremidades das estruturas.

Admitindo a curva gerada pelo cabo como uma parábola, pode-se calcular a flecha f através da equação (FUCHS & ALMEIDA, 1982):

$$f = \frac{a^2 \cdot p}{8 \cdot F_x} \quad (2.2)$$

Adotando a expressão de catenária (FUCHS & ALMEIDA, 1982), a flecha obtém a seguinte equação:

$$f = C \cdot \{ \cosh [(a/2) \cdot C - 1] \}, \quad (2.3)$$

onde o parâmetro de catenária C , dado em metros, é dado pela razão entre a força horizontal F_x , e o peso unitário do cabo condutor p .

2.3.2 ALTURA DE SEGURANÇA

A menor distância do condutor ao solo admissível é chamada de altura de segurança e é determinada em função da tensão da linha e da natureza do terreno atravessado, como está prescrito na NBR5422 (FUCHS & ALMEIDA, 1982).

A altura de segurança h , ilustrada na figura 2.5, representa a menor distância condutor/solo que deve ser admitida durante toda a vida da linha de transmissão. Para dimensioná-la a NBR5422(1985) estabelece:

$$h = A + 0,01 \left[\left(\frac{D_U}{\sqrt{3}} \right) - 50 \right], \text{ se } U > 87kV, \quad (2.4)$$

$$\text{para, } U > 87kV \text{ ou } h = A, \text{ se } U \leq 87kV$$

onde:

U = tensão máxima de operação da linha em kV;

D_U = distância em metros numericamente igual a U ;

h = Altura de segurança em metros;

A = Distância básica, em metros, obtida da tabela nº 5 da referida norma;

2.3.3 CÁLCULO DE COMPRIMENTO DO CABO CONDUTOR

Os condutores empregados em linhas de transmissão são obtidos pelo “encordoamento” de fios metálicos (FUCHS & ALMEIDA, 1982). Sobre um fio de seção transversal são enrolados, na forma espiral, outros fios formando uma ou várias camadas. A especificação dos cabos é dada pelo seu diâmetro nominal, que é determinado em função da área de sua seção transversal nominal, o número de fios e pelo material ou liga metálica que são fabricados. No presente projeto, os cálculos serão realizados baseando-se em um cabo condutor do tipo IBIS com alumínio nu e alma de aço (CAA) e diâmetro nominal de 19,88mm.

O cálculo do comprimento do cabo condutor L (m) pode ser determinado através da equação 2.5 (FUCHS & ALMEIDA, 1982):

$$L = a + \left[\frac{8.f^2}{3.a} \right] \quad (2.5)$$

Como para a determinação da flecha na equação (2.2), a equação (2.5) está relacionada ao comprimento de uma parábola, que é desenvolvida em função do valor de flecha e de sua abertura (vão).

2.3.4 EFEITOS DA VARIAÇÃO TÉRMICA

A temperatura dos cabos condutores em operação depende do equilíbrio entre o ganho, em função do efeito Joule e do aquecimento externo, e a perda de calor, cedido ao meio ambiente.

Os coeficientes de dilatação térmica linear possuem significativa importância, pois são a partir desses dados que se pode determinar a taxa de dilatação e contração do material analisado. As variações de comprimento do cabos são diretamente proporcionais às variações térmicas e aos seus coeficientes de dilatação térmica. Assim, como as flechas a serem formadas dependem do comprimento do cabo condutor, elas também variam de acordo com a temperatura.

A forma mais adequada de calcular essa variação é através das equações de mudança de estado (FUCHS & ALMEIDA). Desta forma, considerando um cabo de comprimento L_1 a uma temperatura T_1 , apoiado nas duas extremidades, com uma variação de temperatura, de T_1 para T_2 , sofrerá um aumento do seu comprimento conforme a equação 2.6:

$$L_2 = L_1 + L_1 \cdot \alpha (T_2 - T_1), \quad (2.6)$$

sendo α o coeficiente de dilatação térmica linear do cabo condutor.

Com a influência da temperatura no comprimento do condutor, a flecha formada é calculada pela equação 2.7:

$$f_T = 3.a. \left[\frac{L_T \cdot a}{8} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

onde f_T é a flecha determinada em função do comprimento do condutor L_T que, por sua vez, está em função da temperatura.

2.4 CARGA DE PRÉ-ESTICAMENTO (Every Day Stress - EDS).

Para cabos, a NBR 5422(1985), estabelece que “Na condição de trabalho de maior duração, caso não tenham sido adotadas medidas de proteção contra os efeitos de vibração, recomenda-se limitar o esforço de tração nos cabos aos valores máximos indicados na tabela 2.1”:

TABELA 2.1 – Cargas máximas recomendadas para cabos, na condição de trabalho de maior duração (FUCHS & ALMEIDA, 1982).

TIPOS DE CABOS	% DE CARGA DE RUPTURA
AÇO AR	16
AÇO EAR	14
AÇO-COBRE	14
AÇO-ALUMÍNIO	14
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

Da figura 2.6 pode-se analisar como essa carga atua no condutor.

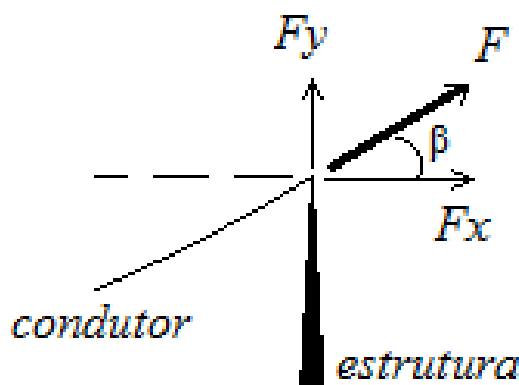


Figura 2.6 – Forças atuantes no cabo.

A força F (EDS) equilibra as demais, logo, pode ser representada através da reação da estrutura ao sistema de forças atuantes. Assim, tem-se:

Força horizontal:

$$F_x = F \cdot \cos\beta. \quad (2.8)$$

Força vertical:

$$F_y = F \cdot \sin\beta = \frac{p \cdot L}{2}, \quad (2.9)$$

onde $\frac{p \cdot L}{2}$ representa o peso do condutor no vão, referente a seu comprimento real.

A razão entre as equações 2.8 e 2.9, leva a seguinte expressão:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{p \cdot L}{2 \cdot T_x} \right) \quad (2.10)$$

onde F_x é constante, mas F varia ao longo da curva, em função do comprimento do cabo. Sendo F a força de tração axial no cabo, sua taxa de trabalho é variável, desde um mínimo, junto ao vértice da curva, a um máximo, junto aos pontos de suspensão (FUCHS & ALMEIDA, 1982).

A NBR5422 (1985) estabelece limitações, por questões de segurança, quanto aos máximos esforços de tração admissíveis nos cabos condutores. Essas limitações são determinadas em função da carga de ruptura W_{rup} do cabo, pela equação 2.11:

$$EDS = k \cdot W_{rup} \quad (2.11)$$

onde k (%) é o coeficiente de redução, determinado em função do tipo de cabo conforme a tabela 2.1.

2.5 FLECHA EXCESSIVA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A localização de cada estrutura de sustentação dos condutores das linhas de transmissão é feita em função de sua própria altura, da topografia do terreno, das alturas de segurança exigidas e da forma da curva que os cabos terão quando estiverem com sua flecha máxima (FUCHS & ALMEIDA, 1982). A flecha a ser analisada deve ser a maior possível em toda a vida útil da LT, pois caso a ultrapasse o projeto teria de ser reavaliado, pois acarretaria na violação dos códigos de segurança.

A energia térmica adquirida pelo condutor devido à corrente elétrica (efeito Joule) e as altas temperaturas ambientes causam expansão térmica nas linhas de transmissão, aumentando significativamente o comprimento do condutor e, conseqüentemente, a flecha. A Figura 2.7 ilustra a variação da flecha Δf em função do aumento da temperatura T_1 para T_2 .

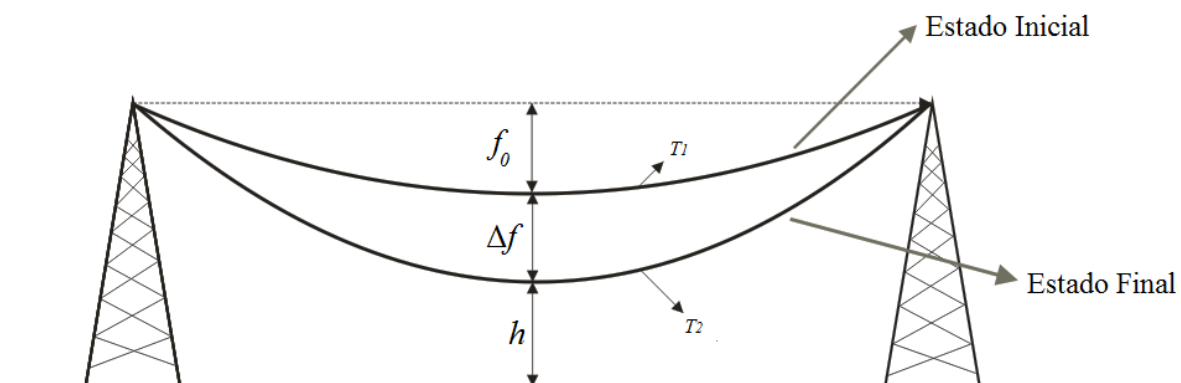


Figura 2.7 – Aumento da flecha em função da variação de temperatura (DA SILVA, 2003-Modificado).

onde para o estado inicial tem-se $T = T_1$ e para o estado final, após aquecimento, tem-se $T = T_2$.

O aumento da flecha gerado pelo aquecimento pode fazer com que a altura de segurança h seja violada. Segundo a NBR5422, o condutor e seus acessórios energizados devem manter uma distância mínima de segurança em relação a árvores, estruturas e rodovias. Sendo assim, muitas vezes as companhias elétricas são obrigadas a reduzir a quantidade de corrente transportada (ampacidade) pela linha, para evitar que o cabo sofra uma grande expansão linear e venha formar uma flecha que infrinja a distância condutor/solo de segurança.

3 PRÉ-PROJETO DO DISPOSITIVO

3.1 CONCEPÇÃO DO SLiM

O *SLiM* é um dispositivo que ajusta a tensão no cabo condutor contraindo e estendendo o mesmo conforme a variação térmica, explorando o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. A Figura 3.1 ilustra o dispositivo *SLiM*.

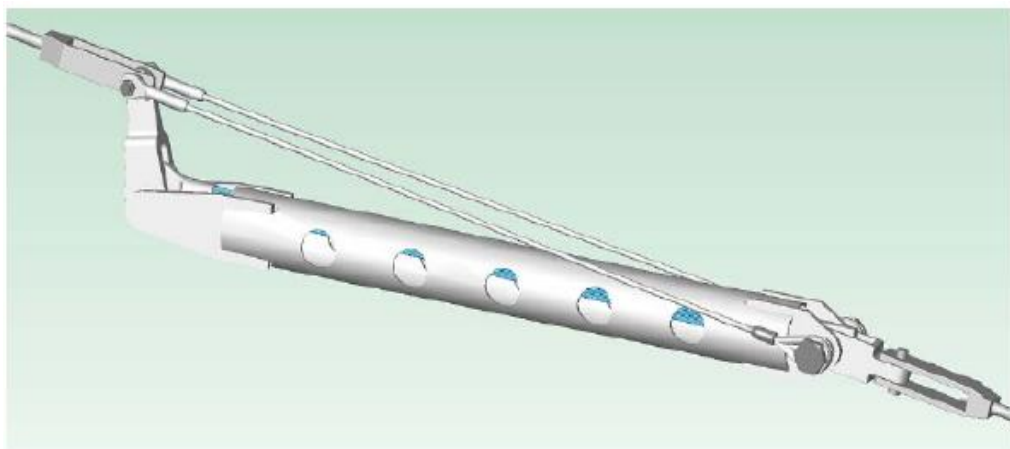


Figura3.1 – SLiM – Sagging Line Mitigator (Shirmohamadi, 2002).

A instalação do *SLiM* é realizada em série, onde o dispositivo é instalado, por meio de conectores padrão em sistemas de linhas de transmissão. Sendo assim, em funcionamento, parte do fluxo de corrente proveniente do cabo condutor é transferida no feixe de SMA e parte pela carcaça do dispositivo. O efeito Joule inicia o processo de aquecimento do cabo condutor e consequentemente do *SLiM*, complementado com a variação térmica do ambiente, contraindo o atuador. Um braço de alavanca, posicionado na extremidade do dispositivo auxilia na amplificação da variação do deslocamento linear do condutor, fazendo com que a variação de comprimento do cabo seja proporcional à variação do feixe de SMA. O braço funciona de tal forma a aumentar a tração no cabo condutor, em função do aquecimento, fazendo com que este reduza seu comprimento e, por conseguinte sanando o problema de flecha excessiva. O processo reverso é realizado a partir do instante em que há uma diminuição da temperatura de operação, onde a tensão no cabo condutor é reduzida e seu comprimento inicial readquirido. A figura 3.2 ilustra o comportamento do braço de alavanca em função da variação térmica.



Figura 3.2 – Braço de alavanca fechado (a) e aberto (b) (Shirmohamadi, 2002).

Para estimar a eficiência do protótipo quando instalado será necessário dimensioná-lo de forma adequada às necessidades e apresentar os detalhes e especificações para sua construção. Para isso, é essencial a análise do comportamento do cabo condutor em função da temperatura, e, por conseguinte, a variação da flecha para as mudanças de temperatura a que o cabo será submetido, podendo assim estipular, conforme a necessidade, um valor limite para a flecha, ou seja, a flecha máxima admissível.

Para a realização destes cálculos alguns valores foram atribuídos, para facilitar a compreensão e demonstrar a efetividade do dispositivo em reduzir significativamente a flecha excessiva. São eles:

- Vão(a) de 400 m;
- O condutor ao atingir a temperatura de 50°C, a distância entre o cabo e o solo estará no limite permitido pela norma de segurança;
- Ao atingir a temperatura de 70°C, o limite de segurança será violado, o dispositivo deverá atuar e corrigi-lo;
- Para a determinação dos comprimentos de flecha e do condutor, para simplificar, será desprezado o tamanho do dispositivo;
- O parâmetro de catenária C é dado pela expressão 3.1, onde é avaliado o nível de tração no condutor F e o peso na linha p para a temperatura de 15°C.

$$C = F / p. \quad (3.1)$$

Porém, deve-se antes, determinar a tração e o peso unitário do cabo para a seguinte situação, utilizando os dados do cabo abaixo:

Dados do Cabo condutor :

Cabo IBIS(CAA - Alumínio nu com alma de aço);

Peso nominal total = 813,3 kg/km;

Carga de Ruptura (Wrup)= 72535,14 N;

Carga de pré-tensionamento (EDS) = 13056,32 N (18% de Wrup);

assim tem-se:

$$F = EDS = 13056,32 \text{ N}; \quad (3.2)$$

$$p = 0,8133 \cdot 9,81 = 7,978 \text{ N/m}; \quad (3.3)$$

Logo, da equação 3.1, tem-se:

$$C = 1636,5 \text{ m}. \quad (3.4)$$

Inicialmente determina-se o valor de flecha à temperatura ambiente (24°C), em função apenas do vão a e do parâmetro de catenária C , pela equação (2.1) desconsiderando as variações de comprimento do cabo que serão sofridas posteriormente, assim, obtém-se:

$$f = a^2/8C \quad (3.5)$$

$$f = 12,22 \text{ m} \quad (3.6)$$

onde:

$$a = 400 \text{ m};$$

$$T_0 = 24^{\circ}\text{C};$$

O comprimento L do condutor, é calculado pela equação (2.5), desenvolvida em função da flecha e do seu vão:

$$L = a + (8.f^2 / 3.a), \quad (3.7)$$

$$L = 401,00 \text{ m}. \quad (3.8)$$

Ao atingir a temperatura de 50°C , o cabo condutor sofre uma dilatação linear, causando um aumento da flecha. Como essa temperatura foi fixada como sendo a que culminaria no valor máximo que a flecha poderia assumir e como o valor de flecha depende diretamente do comprimento do cabo, pode-se, então, através das equações de mudança de estado, calcular o comprimento do cabo a esta temperatura para que assim seja possível determinar o valor da flecha limite.

Desta forma, o comprimento do condutor após a dilatação térmica pode ser calculado pela equação 2.6:

$$L_{50^{\circ}\text{C}} = L + [L.\alpha.(T_2 - T_1)], \quad (3.9)$$

$$L_{50^{\circ}\text{C}} = 401,00 + [401,00 \cdot 24,15 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 24)], \quad (3.10)$$

$$L_{50^{\circ}\text{C}} = 401,252\text{m}, \quad (3.11)$$

onde, $\alpha = 24,15 \cdot 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$, é o coeficiente de expansão térmica linear do condutor utilizado (ALUBAR, 2010).

3.2 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE FLECHA

De acordo com o comprimento do cabo, a 50°C , apresentado na equação (3.11), e considerando o vão de 400m, tem-se que a máxima flecha aceita para essas condições é determinada pela equação:

$$f_{50^{\circ}\text{C}} = \{3 \cdot a \cdot [(L_{50^{\circ}\text{C}} - a) / 8]\}^{1/2}, \quad (3.12)$$

$$f_{50^{\circ}\text{C}} = \{3 \cdot 400 \cdot [(401,252 - 400) / 8]\}^{1/2}. \quad (3.13)$$

Assim, a flecha formada quando o condutor está a 50°C será:

$$f_{50^{\circ}\text{C}} = 13,703\text{m} = f_{\text{LIMITE}} \quad (3.14)$$

Porém, ocasionalmente, o condutor, com o aumento da demanda e/ou por aquecimento solar, pode ser aquecido a temperaturas acima da desejada, fazendo com que a flecha ultrapasse seu valor máximo estabelecido. Assumindo uma temperatura de 70°C , o comprimento do condutor e da flecha, respectivamente, serão:

$$L_{70^{\circ}\text{C}} = L + [L \cdot \alpha \cdot (T - T_0)], \quad (3.15)$$

$$L_{70^{\circ}\text{C}} = 401,00 + [401,00 \cdot 24,15 \cdot 10^{-6} \cdot (70 - 24)], \quad (3.16)$$

$$L_{70^{\circ}\text{C}} = 401,398\text{m}, \quad (3.17)$$

para $L_{70^{\circ}\text{C}}$, tem-se a flecha:

$$f_{70^{\circ}\text{C}} = \{3 \cdot a \cdot [(L_{70^{\circ}\text{C}} - a) / 8]\}^{1/2}, \quad (3.18)$$

$$f_{70^{\circ}\text{C}} = \{3 \cdot 400 \cdot [(401,40 - 400) / 8]\}^{1/2}, \quad (3.19)$$

$$f_{70^{\circ}\text{C}} = 14,482\text{m}. \quad (3.20)$$

Desta forma, tem-se um comprimento de flecha acima do valor máximo permitido. Logo quando atingir a temperatura de 70°C deve haver uma redução da flecha. O valor a ser reduzido é apresentado na equação 3.22:

$$f_{\text{violação}} = f_{70^{\circ}\text{C}} - f_{50^{\circ}\text{C}}, \quad (3.21)$$

$$f_{\text{violação}} = 0,7789\text{m}. \quad (3.22)$$

Para que o dispositivo seja eficaz, deve-se analisar alguns fatores. Começando pela variação do comprimento do dispositivo. Para isso serão apresentadas algumas equações através do modelo desenvolvido por DA SILVA (2003), onde será possível, através da variação do comprimento do dispositivo dimensionar seus componentes, incluindo o atuador, composto por fios de SMA, onde para este será necessário o cálculo para verificar a quantidades de fios necessários para que o feixe suporte a tensão que lhe será aplicada.

Por fim, buscar-se-á realizar um comparativo dos comprimentos do cabo condutor e das flechas formadas, apresentando assim o efeito da ação do dispositivo.

3.3 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO SLiM

Para equacionar o dispositivo, foi utilizado o modelo matemático utilizado por DA SILVA (2012), fechando um triângulo como mostra a figura 3.3, onde é fixado um tamanho do braço de alavanca c e a partir daí é possível determinar as distâncias entre o ponto C e o ponto D (pontos de tração do SLiM), que variam conforme o deslocamento do braço, que por sua vez se movimenta, através do ponto O' , em função da dilatação do feixe de SMA r , representado na figura 3.4, no interior da carcaça.

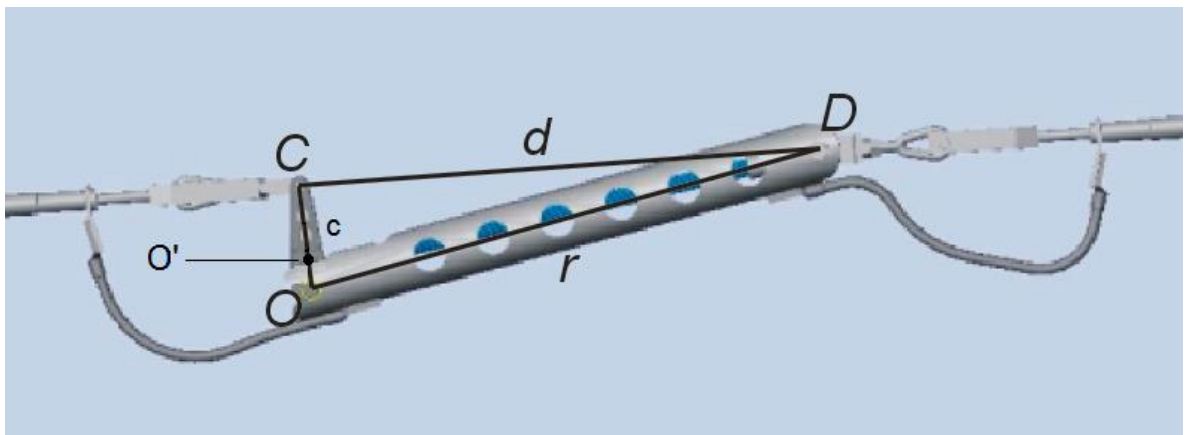


Figura 3.3 – Representação simplificada do SLiM (DA SILVA, 2012).

Onde c é, mais precisamente, a distância entre os pontos O e C (o braço de alavanca é um pouco maior e será determinado posteriormente), d é a distância entre os pontos C e D , L_{SMA} é o comprimento dos fios de SMA e r é a distância entre os pontos O e D .

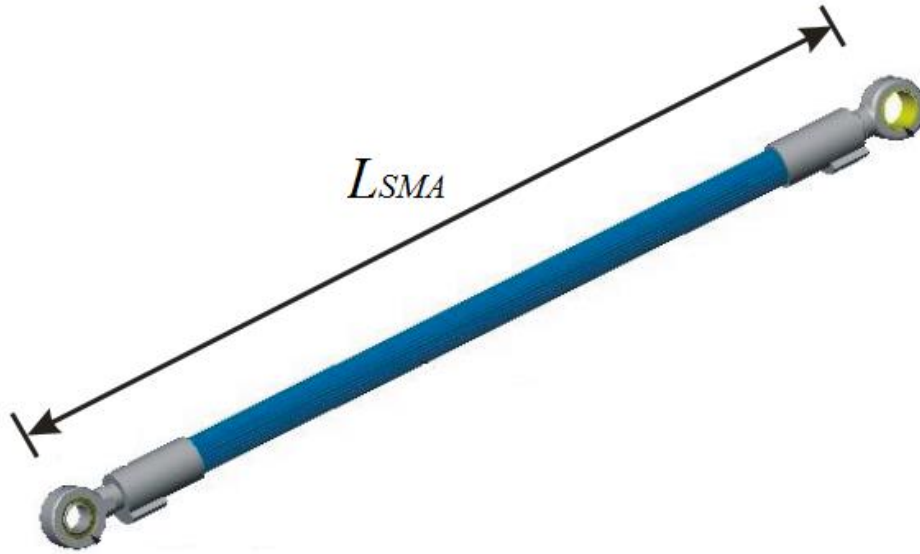


Figura 3.4 – Conjunto de fios de SMA (DA SILVA, 2012).

Tomando como referência a figura 3.4, tem-se a representação esquemática do deslocamento horizontal realizado pelo braço de alavanca, determinado por $\Delta SLiM$ na figura 3.5. Também são representados os comprimentos do conjunto de fios para as variações do braço em função da variação da temperatura, no estado quente (L_Q) e no estado frio (L_F).

Assim, no plano cartesiano, tem-se a seguinte configuração:

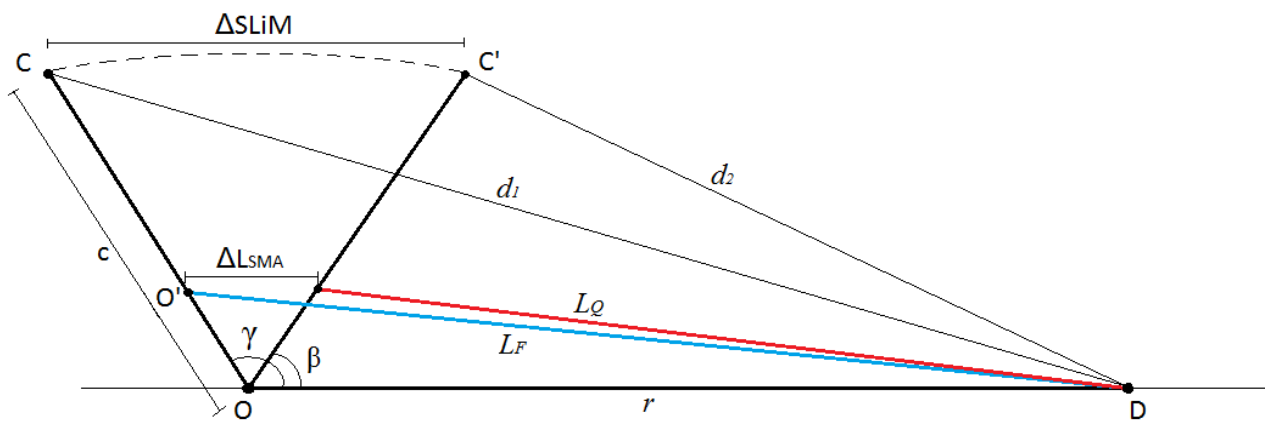


Figura 3.5 – Representação esquemática do SLiM em funcionamento.

3.4 RELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO EFETIVO DO SLiM E A DEFORMAÇÃO DO SMA

Para estabelecer uma relação entre a variação do feixe de SMA (ΔL_{SMA}) e a variação de comprimento horizontal do braço (ΔL_{LiM}), é necessária, dentre outras variáveis, a taxa de deformação da SMA que determinará o quanto o fio será contraído linearmente após exposto a variação térmica. Para isso, será utilizada uma deformação ϵ_{SMA} de 8%, valor típico para ligas NiTi.

A Figura 3.6 ilustra a deformação do fio de SMA em função da temperatura. O material no estado frio (L_F) encontra-se deformado quasiplasticamente na condição onde há um pré-carregamento aplicado em função do peso do cabo. No estado quente (L_Q), o material, após submetido a um aquecimento, seja pelo fluxo de corrente ou pelo calor solar, recupera sua deformação quasiplástica.

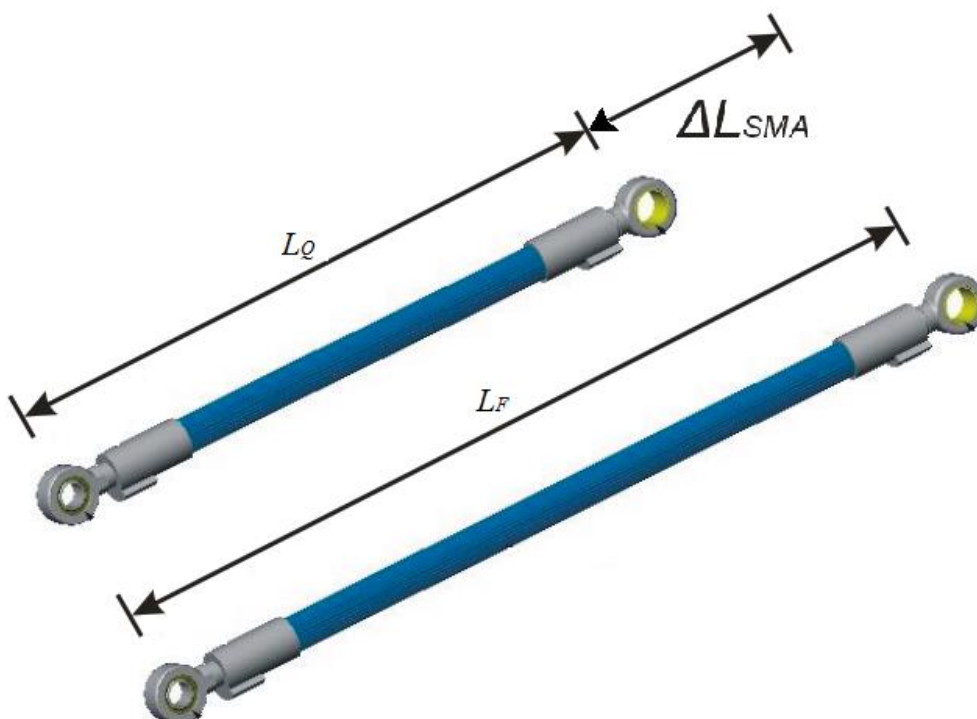


Figura 3.6 – Deformação de um fio de SMA devido à variação de temperatura.

A equação da taxa de deformação da SMA em função do comprimento do feixe de SMA pode ser determinada pela expressão 3.23, podendo assim estabelecer algumas relações:

$$\varepsilon_{SMA} = \frac{\Delta L_{SMA}}{L_F}. \quad (3.23)$$

Mas:

$$\Delta L_{SMA} = L_F - L_Q. \quad (3.24)$$

Assim:

$$\varepsilon_{SMA} = \frac{L_F - L_Q}{L_F}. \quad (3.25)$$

Logo,

$$L_Q = L_F (1 - \varepsilon_{SMA}). \quad (3.26)$$

3.5 QUANTIDADE DE FIOS DE SMA NO ATUADOR.

Para o cálculo da quantidade de fios de SMA que o atuador necessita inicialmente, para suportar a carga quando tensionado utiliza-se as especificações do cabo (apresentadas na seção 3.1) e do fio de SMA para determinar esses valores.

Dados do fio de SMA a ser utilizado:

- Limite de escoamento na fase martensítica, $\sigma_{esc} = 150MPa$ (AERNOUDT, 1987);
- Diâmetro do fio, $D=2mm$.

Para determinar a quantidade de fios, deve-se calcular a área da seção transversal do conjunto de fios necessária para suportar a carga de pré-tensionamento, sem violar o limite de escoamento da liga na fase martensítica.

Assim tem-se:

$$\sigma = F / A, \quad (3.27)$$

$$150 = 13056,32 / A, \quad (3.28)$$

$$A = 87,04mm^2. \quad (3.29)$$

Considerando um fio com diâmetro de 2mm, tem-se a área de $3,14mm^2$ por fio. A área da seção circular do cabo foi determinada através da equação 3.29, relacionando a área de um fio

com a área necessária serão utilizados 28 fios de SMA no dispositivo como apresentado na equação 3.31.

$$n^{\circ} \text{ fios} = A_{TOTAL} / A_{FIO} . \quad (3.30)$$

$$n^{\circ} \text{ fios} = 87,04 / 3,14 = 28 \text{ fios}. \quad (3.31)$$

3.6 AÇÃO EFETIVA E DIMENSIONAMENTO DO SLiM

Como observado nos cálculos das flechas na seção 3.2, há uma violação do limite de segurança que deve ser corrigido. Aplicando os parâmetros e as equações apresentadas até o presente momento será possível dimensionar o dispositivo, com o intuito de quantificar sua funcionalidade e apresentar a efetividade de sua aplicação para o problema proposto. Primeiramente, será apresentado um modelo geral, para que, a partir deste seja possível determinar as dimensões do dispositivo para uma situação específica.

A partir da figura 3.5, tem-se o deslocamento realizado pelo dispositivo ($\Delta SLiM$), que é determinado pela diferença entre o comprimento máximo que o condutor atinge (L_{sup}) e o comprimento máximo admissível (L_{adm}), em função das temperaturas máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e mínima ($T_{m\acute{i}n}$) de operação.

Assim tem-se a equação:

$$\Delta SLiM = L_{sup} - L_{adm} . \quad (3.32)$$

Da figura 3.7 é possível estabelecer uma relação através do deslocamento angular realizado pelo braço de alavanca c , limitando γ a 120° e β a 60° , podendo assim determiná-lo, onde $\Delta SLiM$ e $\Delta LSMA$, pelo deslocamento linear equivalente ao deslocamento angular realizado pelo braço, simplificando o modelo:

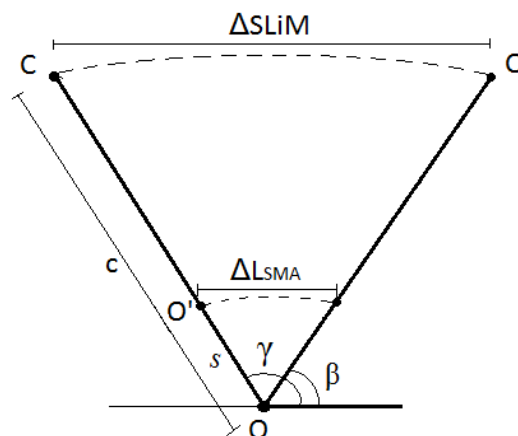


Figura 3.7 – Representação esquemática do deslocamento do braço de alavanca.

Assim, limitando o deslocamento do braço a 60° , tem-se:

$$\Delta SLiM = (\gamma/2) \cdot c. \quad (3.33)$$

Utilizando o mesmo princípio para a determinação do c , pode-se determinar o valor de s , que é a distância entre os pontos O e O' , sendo este o ponto onde o feixe de SMA será fixado.

$$\Delta LSMA = (\gamma/2) \cdot s. \quad (3.34)$$

A partir da variação do deslocamento horizontal do braço de alavanca ($\Delta SLiM$) e do feixe de SMA ($\Delta LSMA$) em função da variação térmica, pode-se determinar o fator de amplificação n , através da equação(3.35):

$$n = \Delta SLiM / \Delta LSMA. \quad (3.35)$$

Deve-se também determinar os valores de r (carcaça), d_1 e d_2 , sendo estas as distâncias entre os pontos C e D em função de L_F e L_Q , respectivamente, onde a partir do valor de d_1 será possível dimensionar uma haste de segurança que limitará o braço de alavanca ao ângulo pré-determinado. Assim, da figura 3.5, pode-se, separadamente, analisar as figuras 3.8 e 3.9.

Pelas relações trigonométricas de um triângulo qualquer, para um ângulo γ de 120° e β de 60° , tem-se para a figura 3.8:

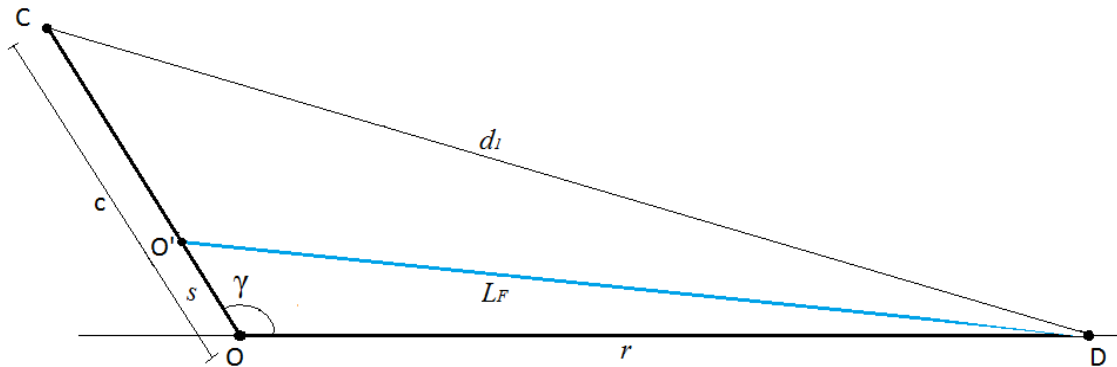


Figura 3.8 – Representação esquemática do dispositivo aberto (L_F).

Do triângulo OCD e $OO'D$, tem-se, respectivamente, as seguintes relações:

$$d_1^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \gamma, \quad (3.36)$$

$$L_F^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \gamma, \quad (3.37)$$

Da mesma forma, para a figura 3.9, tem-se:

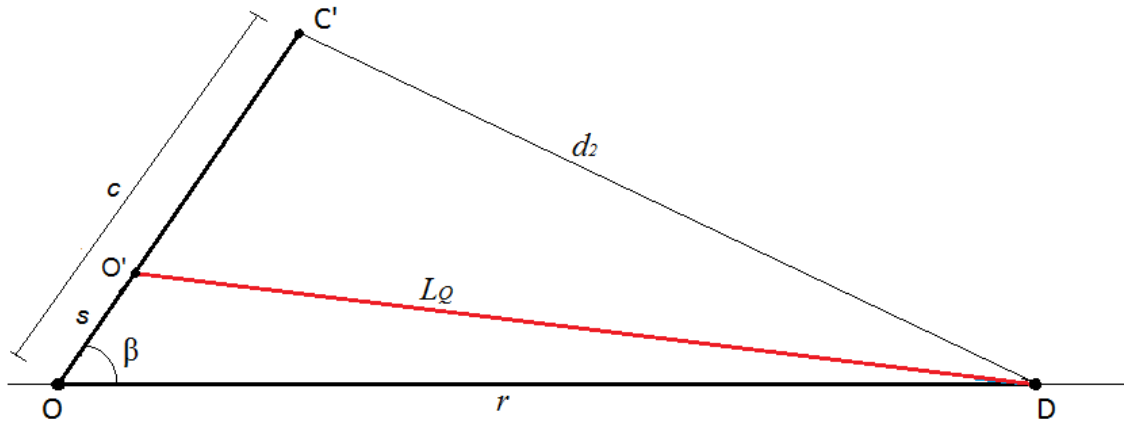


Figura 3.9 – Representação esquemática do dispositivo fechado (L_Q).

Do triângulo $OC'D$ e $OO'D$, tem-se, respectivamente, as seguintes relações:

$$d_2^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot c \cdot r \cdot \cos \beta, \quad (3.38)$$

$$L_Q^2 = r^2 + s^2 - 2 \cdot r \cdot s \cdot \cos \beta. \quad (3.39)$$

3.7 CASO ESPECÍFICO

Para a determinar o comprimento do feixe de SMA a ser utilizado (L_F), algumas iterações foram realizadas, em função do ponto de fixação do SMA ao braço de alavanca, tomando como referência alguns dados já conhecidos, como o comprimento do braço c , a carga de pré-esticamento EDS , a deformação típica para ligas NiTi (ϵ_{sma}) bem como sua tensão de escoamento máxima. As variáveis já determinadas são:

$$EDS = 13056,32 \text{ N}$$

$$A = 87,04 \text{ mm}^2 \quad (\text{Área da seção do feixe de SMA com 28 fios})$$

$$\epsilon_{sma} = 8\%$$

Considerando o comprimento máximo do condutor igual ao $L_{70^\circ C}$ e o comprimento máximo admissível igual ao $L_{50^\circ C}$, tem-se através da equação 3.32:

$$\Delta SLiM = 401,398 - 401,252, \quad (3.40)$$

$$\Delta S_{LiM} = 146,4\text{mm} \quad (3.41)$$

O braço de alavanca c é determinado pela equação 3.33, obtendo, portanto:

$$146,4 = (\pi/3) \cdot c \quad (3.42)$$

$$c = 139,80\text{mm} \quad (3.43)$$

A tabela 3.1 apresenta os valores das variáveis obtidas em função da variação do comprimento s .

TABELA 3.1 – Variação do comprimento do feixe em função de s .

-	s (mm)	ΔL_{sma} (mm)	L_F (mm)	F_{sma} (N)	σ (Mpa)
1	34,86	36,51	456,38	52225,28	600,00
2	46,47	48,95	611,88	39168,96	450,00
⇒ 3	69,71	73,00	912,50	26112,64	300,00
⇒ 4	73,38	76,84	960,53	24807,01	285,00
⇒ 5	71,69	75,08	938,45	25459,82	292,51
6	66,39	69,52	869,05	27418,27	315,00
⇒ 7	139,42	146,00	1825,00	13056,32	150,00

Desta forma, como para alguns valores de s o limite de escoamento do material é ultrapassado, deve-se utilizar apenas, para este caso, os valores de s que se encontrem na faixa de escoamento permitida de 150 a 300MPa de acordo com AERNOUDT (1987), ou seja, para as situações assinalados com uma seta na lateral da tabela 3.1. A situação cinco, marcada em vermelho na tabela 3.1, será tomada como referência, para um estudo mais específico, tendo em vista que atende às necessidades, sem infringir o limite de escoamento da martensita e dando uma pequena margem de segurança em relação ao caso 3, ainda da tabela 3.1, que estaria no limite máximo de escoamento.

Com o propósito de apresentar a efetividade em uma situação real, algumas variáveis de contorno foram atribuídas para uma melhor visualização do dispositivo em funcionamento. São elas:

- $a = 400\text{m}$ (Vão)
- $C = 1636,5\text{m}$ da equação 3.4 (Parâmetro de Catenária)
- $T_0 = 24^\circ\text{C}$ (Temperatura ambiente)
- $T_1 = 50^\circ\text{C}$ (Temperatura máxima admissível p/ flecha segura)
- $T_2 = 70^\circ\text{C}$ (Temperatura máxima de operação)
- $\alpha = 18,25 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Coeficiente de dilatação linear)
- $\epsilon_{\text{SMA}} = 8\%$ (taxa de deformação da liga de SMA)
- $\gamma = 120^\circ$ (Ângulo máximo da alavanca em relação à carcaça)
- $\beta = 60^\circ$ (Ângulo mínimo da alavanca em relação à carcaça)
- $c = 139,80\text{mm}$ da equação 3.43 (Braço de alavanca)
- $s = 71,70\text{mm}$ (Distância entre a fixação do SMA e o eixo de rotação do braço)

Dessarte, os resultados obtidos são:

- $L_{50^\circ\text{C}} = L_{adm} = 401,252\text{m}$ (Comprimento do condutor a 50°C)
- $f_{50^\circ\text{C}} = 13,703\text{m}$ (Flecha formada a 50°C - **flecha máxima** admissível)
- $L_{70^\circ\text{C}} = L_{sup} = 401,398\text{m}$ (Comprimento do condutor a 70°C)
- $f_{70^\circ\text{C}} = 14,482\text{m}$ (Flecha formada a 70°C)
- $f_{\text{violação}} = 0,7789\text{m}$ (Flecha de violação – comprimento a ser restituído)
- $\Delta\text{SLiM} = 146,4\text{mm}$ (Variação máxima do braço de alavanca)
- $L_F = 938,45\text{mm}$ (Comprimento do feixe de SMA, na condição fria)
- $L_Q = 863,4\text{mm}$ (Comprimento do feixe de SMA, na condição quente)
- $\Delta L_{\text{SMA}} = 75,10\text{mm}$ (Variação linear máxima do feixe de SMA)
- $n = 1,95$ (Fator de amplificação)
- $d_1 = 978,00\text{mm}$ (Distância máxima entre D e C' - figura 3.9 – **cabo de segurança**)
- $d_2 = 839,40\text{mm}$ (Distância mínima entre D e C' – figura 3.9)
- $r = 900,50\text{mm}$ (Comprimento da carcaça do dispositivo)

Assumindo, agora, a instalação do SLiM, para que o problema da flecha excessiva seja sanado, nestas condições, a flecha deverá sempre estar menor que a que foi obtida a 50°C, que foi a temperatura que gerou a flecha máxima admissível.

Sendo assim, tem-se que:

$$f_{\text{máx}} \leq 13,703\text{m} . \quad (3.44)$$

Com a ação do SLiM, o cabo condutor deve assumir um comprimento, a 70°C, menor ou no máximo igual ao valor que possuía a 50°C, sem o auxílio do dispositivo, ou seja, $\Delta\text{SLiM} \geq 0,140\text{m}$, respeitando assim o limite de segurança pré-estabelecido.

Logo, para $\Delta\text{SLiM} = 0,1464\text{m}$, tem-se:

$$\text{LSLiM}(70^\circ\text{C}) = L_{70^\circ\text{C}} - \Delta\text{SLiM} \quad (3.45)$$

$$\text{LSLiM}(70^\circ\text{C}) = 401,398 - 0,1464 \quad (3.46)$$

$$\text{LSLiM}(70^\circ\text{C}) = 401,251\text{m} \quad (3.47)$$

A flecha que será formada com a atuação do SLiM será:

$$f_{\text{SLiM } 70^\circ\text{C}} = \{3.a.[(L_{\text{SLiM } 70^\circ\text{C}} - a) / 8]\}^{1/2} , \quad (3.48)$$

$$f_{\text{SLiM } 70^\circ\text{C}} = 13,702\text{m} . \quad (3.58)$$

Portanto a utilização do dispositivo apresentará uma redução de flecha em 13,702m, limitando-a a distância mínima exigida.

A figura 3.10 apresenta esquematicamente uma linha de transmissão com o SLiM instalado, reduzindo a flecha excessiva após ser submetido a um aquecimento, com uma flecha final respeitando os padrões de segurança.

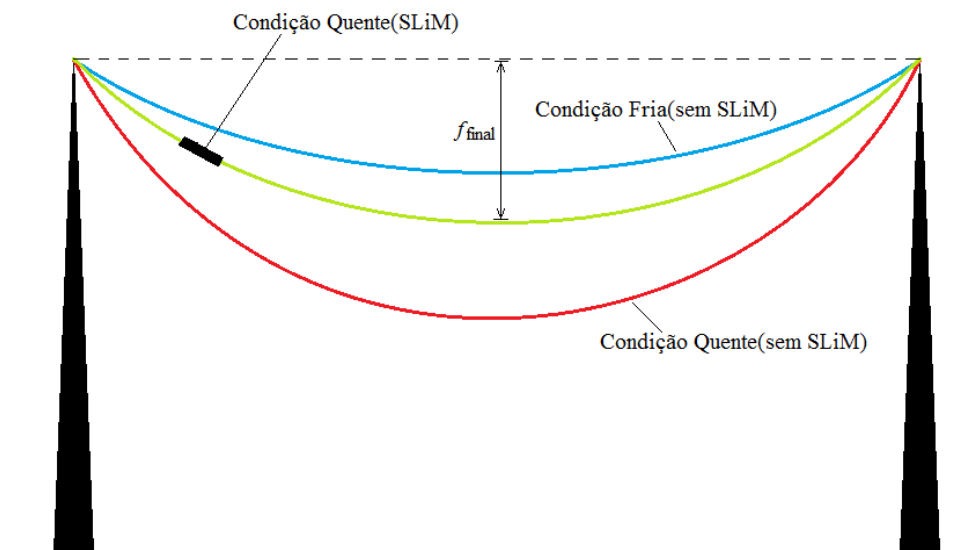


Figura 3.10 – Configuração do SLiM em funcionamento.

4 PROJETO

O dispositivo utiliza um braço de alavanca mecânica para variar o comprimento do atuador, alongando ou encurtando o comprimento efetivo do condutor (Figura 4.1). O atuador é constituído por fios, de liga com memória de forma, fixados paralelamente nas extremidades por meio de braçadeiras. A carcaça, de perfil tubular, retangular ou em “U”, serve como a carcaça do dispositivo, funcionando como um ponto de fixação para o braço de alavanca que por sua vez transmite uma relação de ampliação e redução em função da mudança de comprimento do atuador.

O dispositivo é instalado em série com o cabo condutor e transporta a corrente elétrica da linha, podendo dividir a corrente entre o atuador e a carcaça do dispositivo através de conectores flexíveis que conduzem a corrente entre o cabo condutor e o dispositivo e entre a carcaça e o atuador.

A seleção dos materiais do dispositivo deverá seguir alguns critérios, incluindo resistência mecânica, em função das forças aplicadas, resistência à corrosão, por estar exposto às mais variadas condições ambientais, custos e posteriormente às características elétricas a que será submetido. Porém, o enfoque deste projeto restringe-se à análise mecânica.

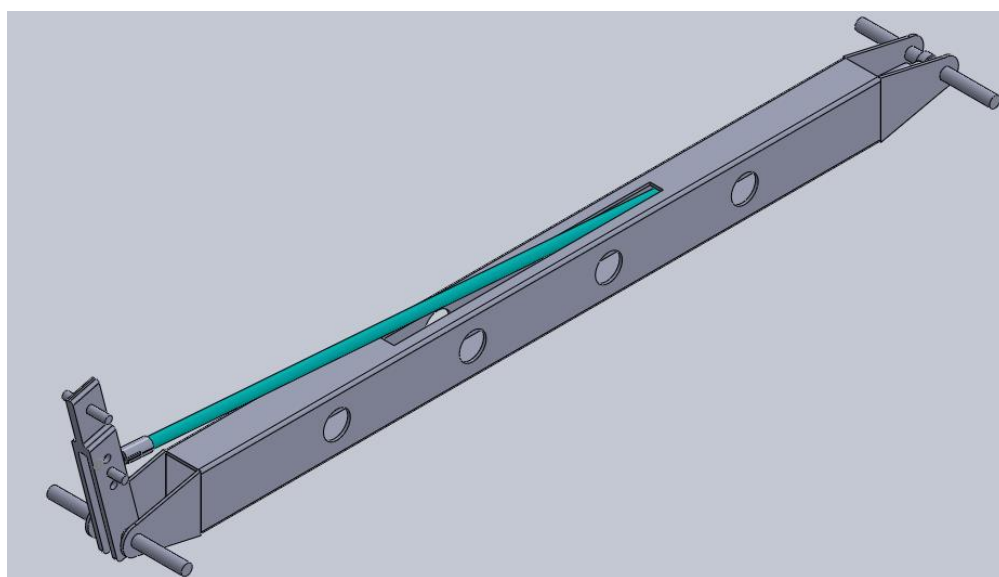


Figura 4.1 – Dispositivo mitigador de flecha baseado na concepção do SLiM.

4.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

Atuador - O atuador é constituído por fios, de liga com memória de forma, mantidos paralelamente um ao outro por meio de braçadeiras nas extremidades (Figura 4.2). O atuador é

alongado ou encurtado de forma inversamente proporcional à variação de temperatura, ou seja, diminui seu comprimento com o aumento de temperatura da mesma forma que com a redução térmica tem um aumento de seu comprimento. Embora a maior parte da corrente elétrica passe através da carcaça e dos conectores, parte da corrente pode ser transmitida pelo atuador, proporcionando o calor necessário para a transformação martensítica. O número de fios com memória de forma utilizados no atuador é determinado pela força aplicada nas extremidades do feixe de SMA, em função do peso nominal do cabo condutor e do diâmetro dos fios de SMA a serem utilizados.

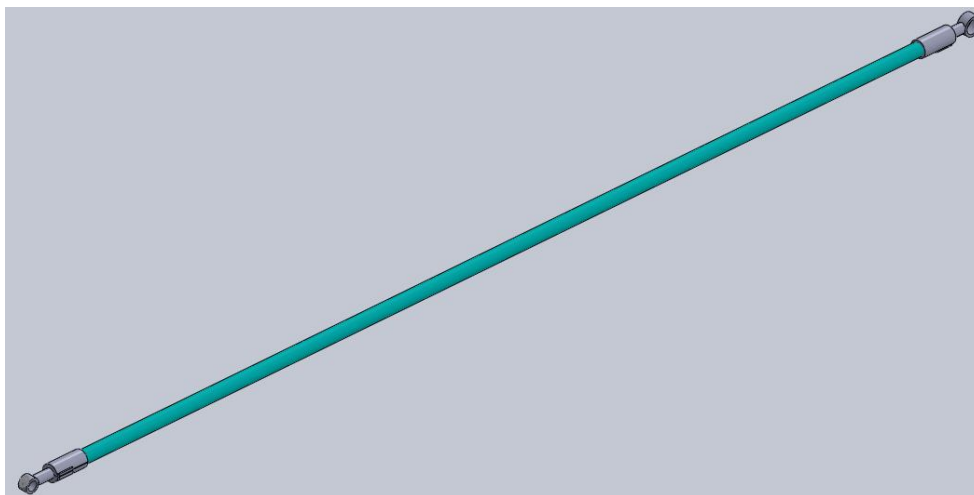


Figura 4.2 – Atuador(feixe de fios de SMA).

Olhal de fixação - Realiza a conexão entre o atuador e o braço de alavanca (Figura 4.3), em uma extremidade, e a outra extremidade da carcaça que por sua vez é conectada ao cabo condutor.

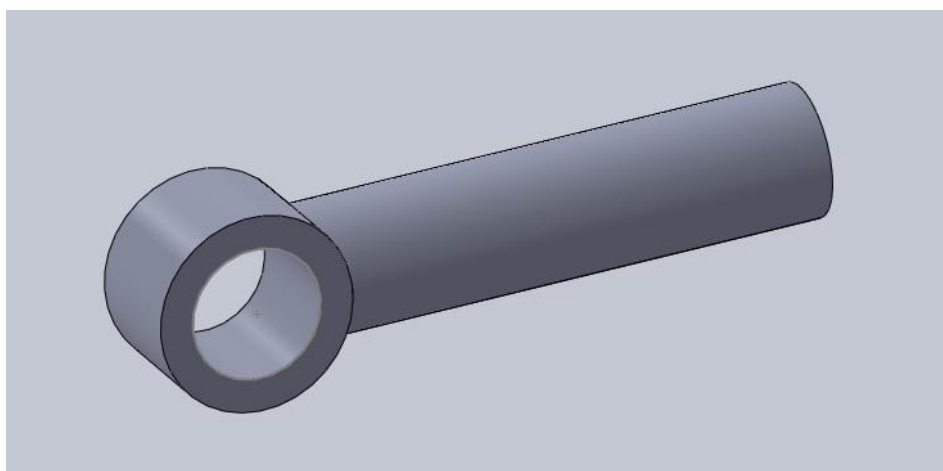


Figura 4.3 – Olhal.

Braçadeira – Realiza a fixação por meio de prensagem do atuador (feixe de fios de SMA) e do olhal de fixação (Figura 4.4).

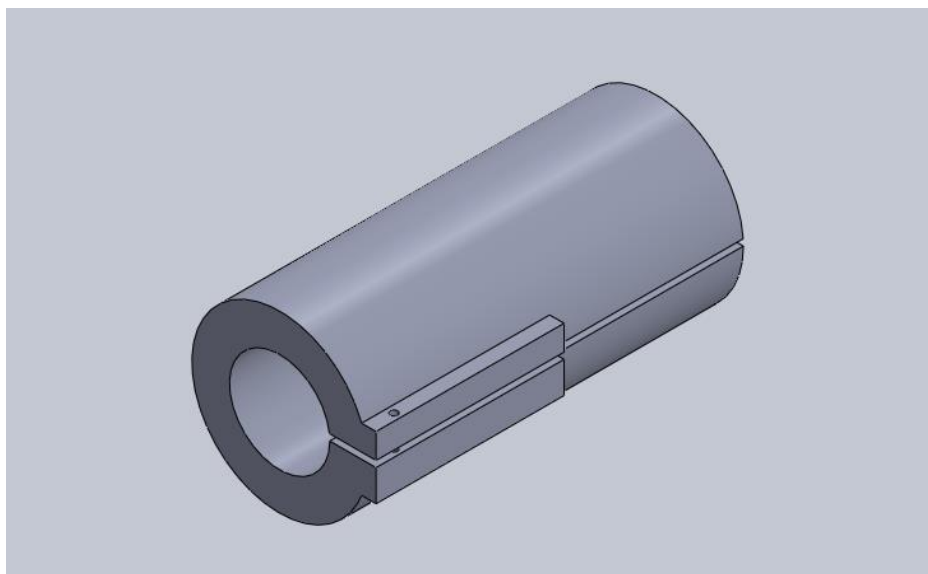


Figura 4.4 – Braçadeira.

Carcaça – Serve de apoio às articulações do braço de alavanca, em uma extremidade e da conexão do cabo condutor, na outra extremidade. Alguns furos maiores foram feitos em torno da carcaça com o intuito de permitir um melhor escoamento do vento, quando instalado na linha de transmissão.

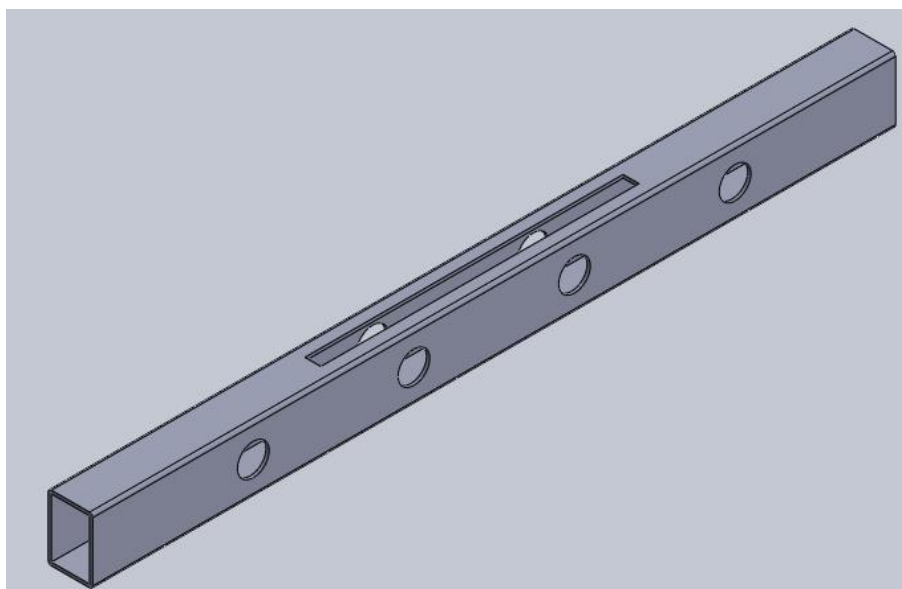


Figura 4.5 – Carcaça(1).

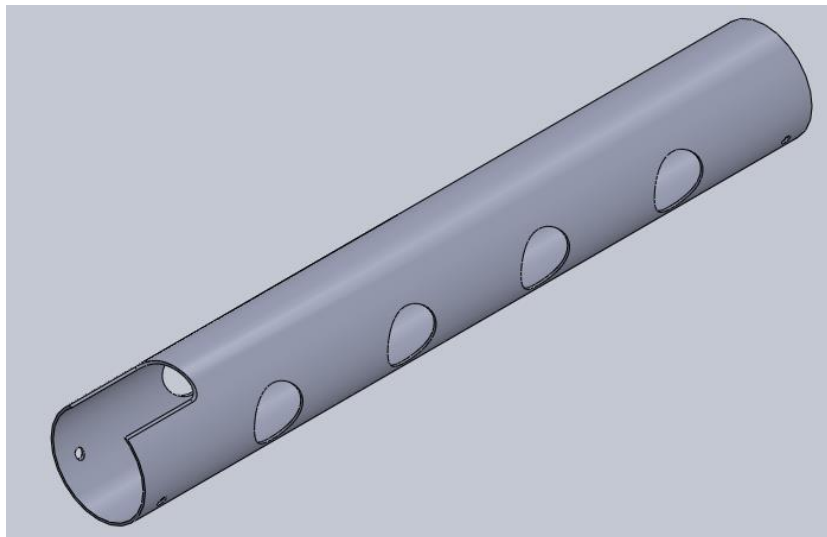


Figura 4.5 – Carcaça(2).

Braço de alavanca – O braço de alavanca tem a função de proporcionar a ampliação da redução do cabo condutor, em função da variação de ΔL_{SMA} e ΔS_{LiM} . A concepção atual requer a utilização de apenas um braço de alavanca, de um lado do dispositivo dando ao sistema uma configuração triangular. Como os componentes do dispositivo foram desenvolvidos em função do tamanho do braço de alavanca, foram feitos dois furos extras, um acima e um abaixo do furo principal, onde será conectado o atuador, possibilitando uma alteração de posicionamento do feixe de SMA durante a instalação do SLiM, variando assim a relação de redução do dispositivo.

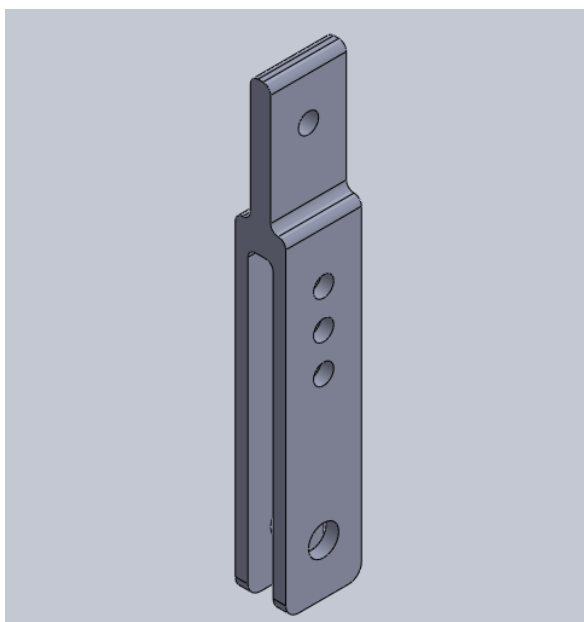


Figura 4.6 – Braço de alavanca.

Cabo de segurança – Funciona como uma ligação de segurança com uma resistência à ruptura, adotada, superior a 110% da carga de ruptura do condutor. Embora o atuador suporte o condutor a

maior parte do tempo, a ligação de segurança apoia a tensão do condutor, quando as temperaturas do condutor estiverem abaixo da temperatura de transformação de fase, ou seja, quando o atuador realiza o menor esforço. Esta conexão para a segurança também se engaja em caso de sobrecarga ou falha mecânica do atuador ou de alguma articulação do dispositivo.

4.2 MATERIAIS DO DISPOSITIVO

Para a seleção dos materiais para concepção do SLiM alguns critérios devem ser considerados, tais como: a estrutura deve suportar a tensão aplicada pelo peso do cabo condutor da linha de transmissão, a estrutura também deverá permitir o movimento gerado em função da expansão e contração do feixe de SMA do atuador, bem como suportar as variações de tensão decorrentes desse movimento, deverá existir um sistema de fixação entre o dispositivo e a linha de transmissão, por ser exposto às diversas condições temporais faz-se necessária também a resistência a corrosão do material utilizado. A tabela 4.1 apresenta uma lista dos componentes mais relevantes e seus respectivos materiais, com um adendo que, posteriormente, para uma melhor realização do projeto faz-se necessária a caracterização da liga com memória de forma utilizada no atuador, bem como suas propriedades elétricas e térmicas.

Tabela 4.1 – Materiais dos componentes (SIDERAÇO & FECHOMETAL, 2013).

Propriedade	Unidades	AISI - 1020 Aço carbono	Aço carbono fundido	AISI - 321 Aço Inox
Componentes	-	CARCAÇA e BRAÇO DE ALAVANCA	PINOS DE FIXAÇÃO	CARCAÇA e BRAÇO DE LAVANCA
Propriedade do Material				
Densidade	kg/m³	7750,40	7861,12	7805,76
Dureza	HB	430	170	180
Propriedades mecânicas				
Limite de resistência	MPa	439,98	512,97	578,47
Limite de escoamento	MPa	370,25	484,70	293,03
Módulo de elasticidade	MPa	204,77	199,95	204,08

5 ANÁLISES E RESULTADOS

Baseando-se nas especificações apresentadas no capítulo 4, dois protótipos foram pré-concebidos para que os principais componentes pudessem ser analisados estaticamente, por meio da análise de tensões por elementos finitos utilizando o SOLIDWORKS. Desta forma são apresentadas algumas das possíveis soluções para o projeto do dispositivo, comparando-as com o propósito de apresentar, por fim, a melhor alternativa.

5.1 ESTUDO DO BRAÇO DE ALAVANCA (Figura 5.1)

Propriedades do material


Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa: 0.401728 kg Volume: 5.08516e-005 m³ Densidade: 7900 kg/m³ Peso: 3.93693 N </p>	<p> Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.29 Massa específica: 7900 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.7e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.5e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1 (Corte-extrusão1)(ALAVANCA)
Dados da curva: N/A		

Figura 5.1 – Dados do braço de alavanca

As figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as análises das tensões de von Mises, fator de segurança, deslocamento e deformação para o braço de alavanca.

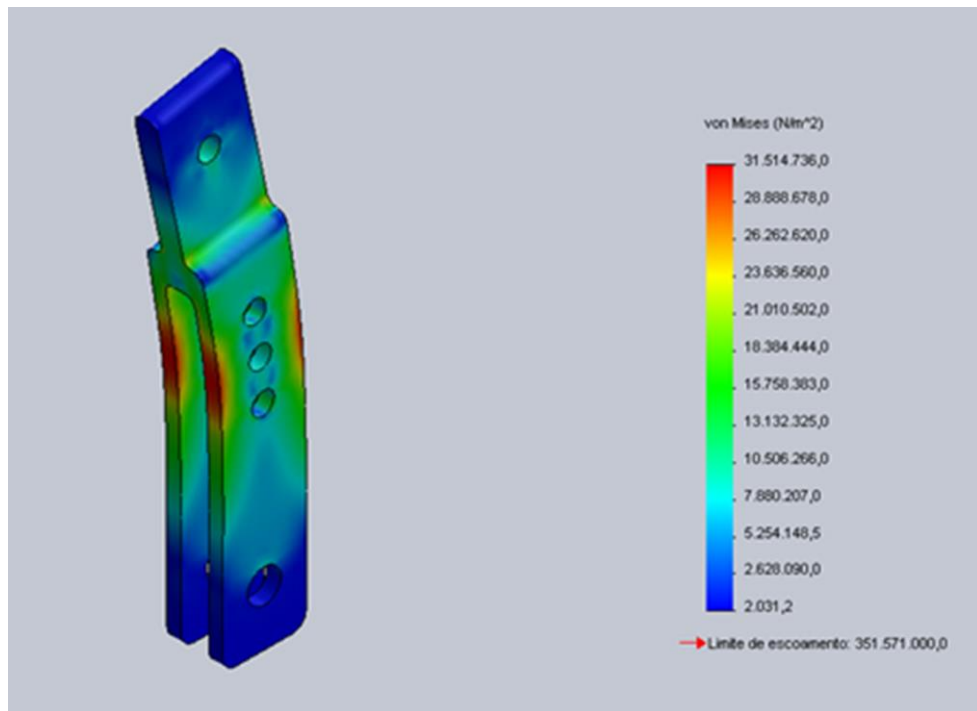


Figura 5.2 – Campo de tensões atuantes no braço de alavanca.

Verificou-se então que a tensão máxima é aproximadamente 31,5MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 350MPa aproximadamente, gerando assim um fator de segurança de 11,16.

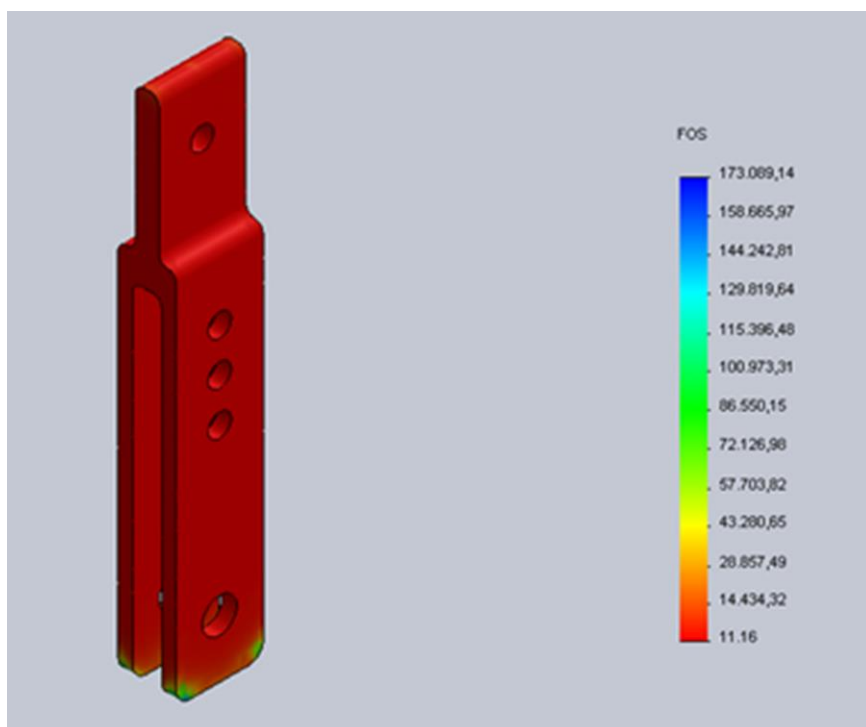


Figura 5.3 – Fator de segurança das tensões atuantes no braço de alavanca.

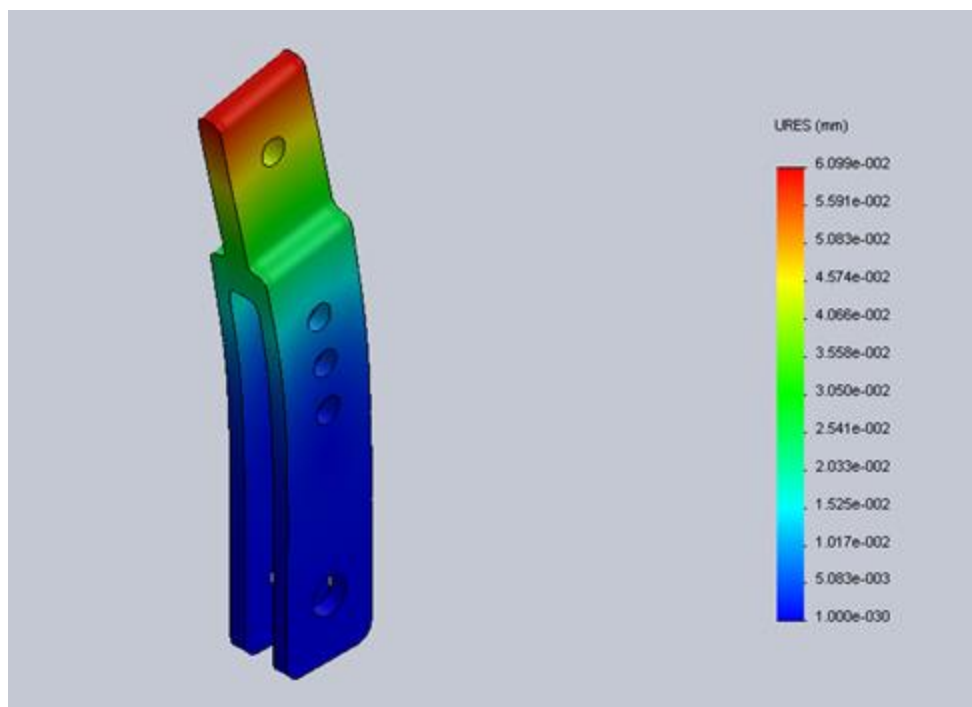


Figura 5.4 – Campo de deslocamento em função das tensões atuantes no braço de alavanca.

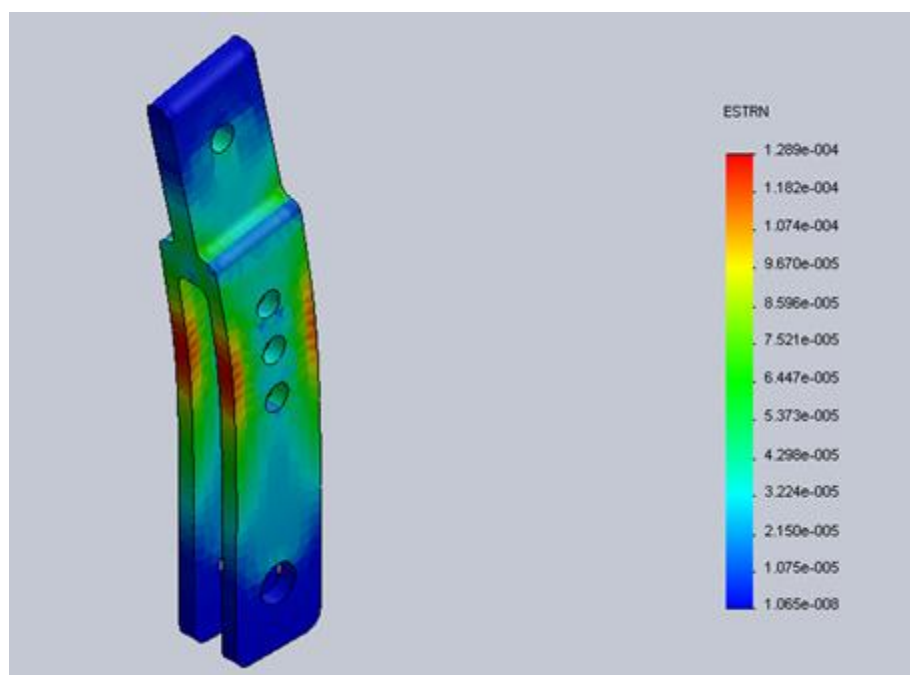


Figura 5.5 – Campo de deformação em função das tensões atuantes no braço de alavanca.

Pode-se observar, também, a deformação e deslocamento máximos do braço de alavanca de 0,06mm e $1,2 \cdot 10^{-4}$ mm, respectivamente.

5.2 ESTUDO DA CARÇAÇA (Figura 5.6)

Propriedades do material

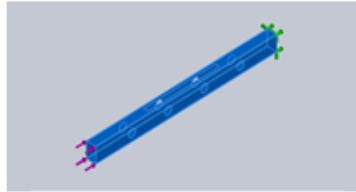
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa: 3.22954 kg Volume: 0.000408803 m³ Densidade: 7900 kg/m³ Peso: 31.6495 N </p>	<p> Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.29 Massa específica: 7900 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.7e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.5e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1(Corte-extrusão2)(Carçaça)
Dados da curva: N/A		

Figura 5.6 – Dados da carçaça – perfil retangular

As figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam as análises das tensões de von Mises, fator de segurança, deslocamento e deformação para a carçaça com o perfil retangular.

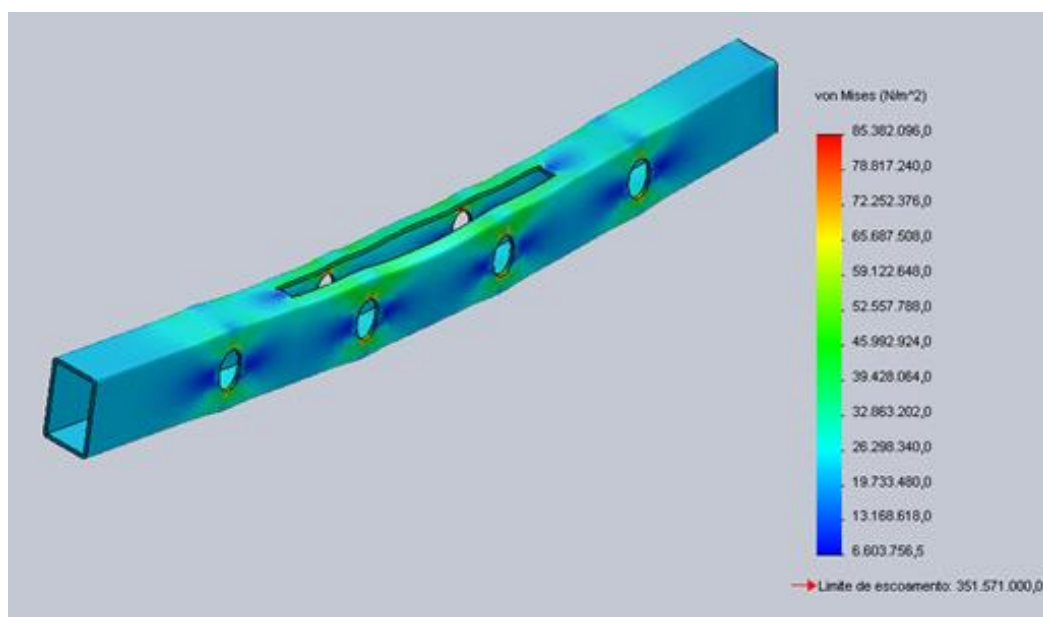


Figura 5.7 – Campo de tensões atuantes na carçaça

Verificou-se então que a tensão máxima de aproximadamente 85,4MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 350MPa aproximadamente, gerando assim um fator de segurança de 4,12.

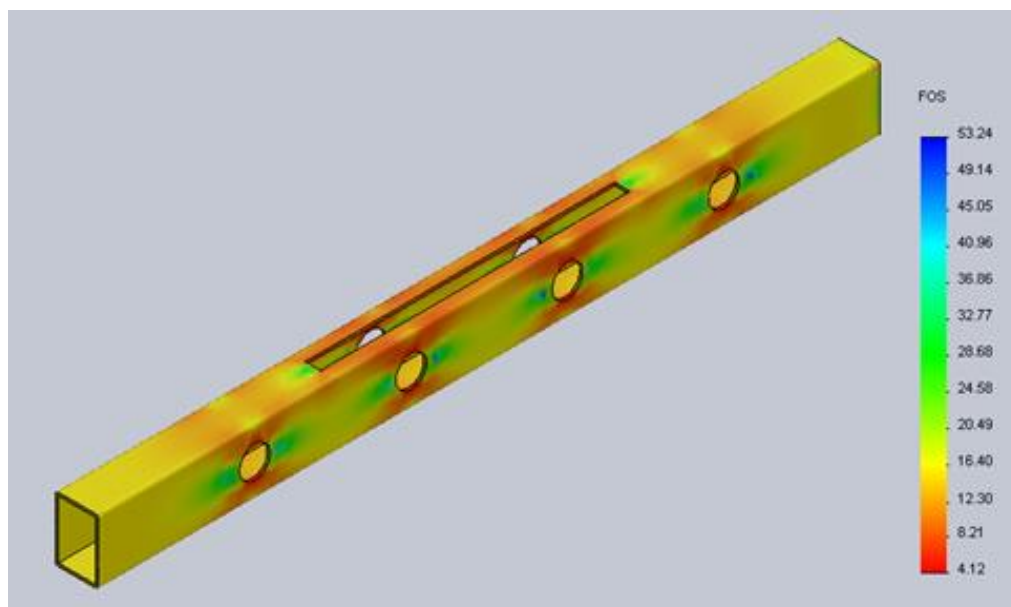


Figura 5.8 – Fator de segurança atuantes na carcaça

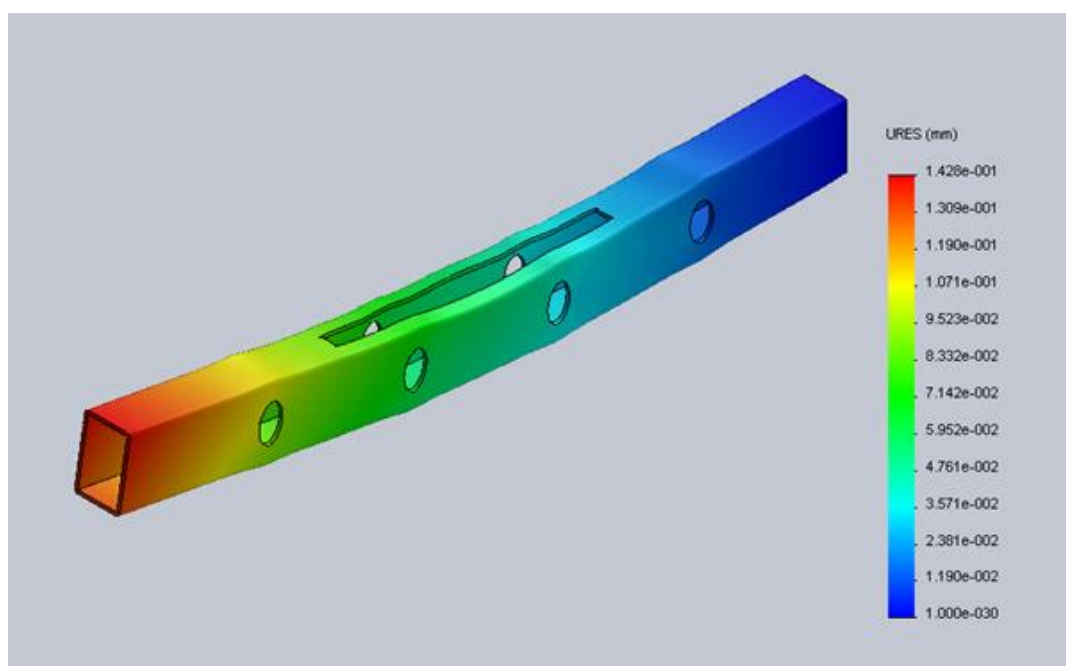


Figura 5.9 – Campo de deslocamento da carcaça.

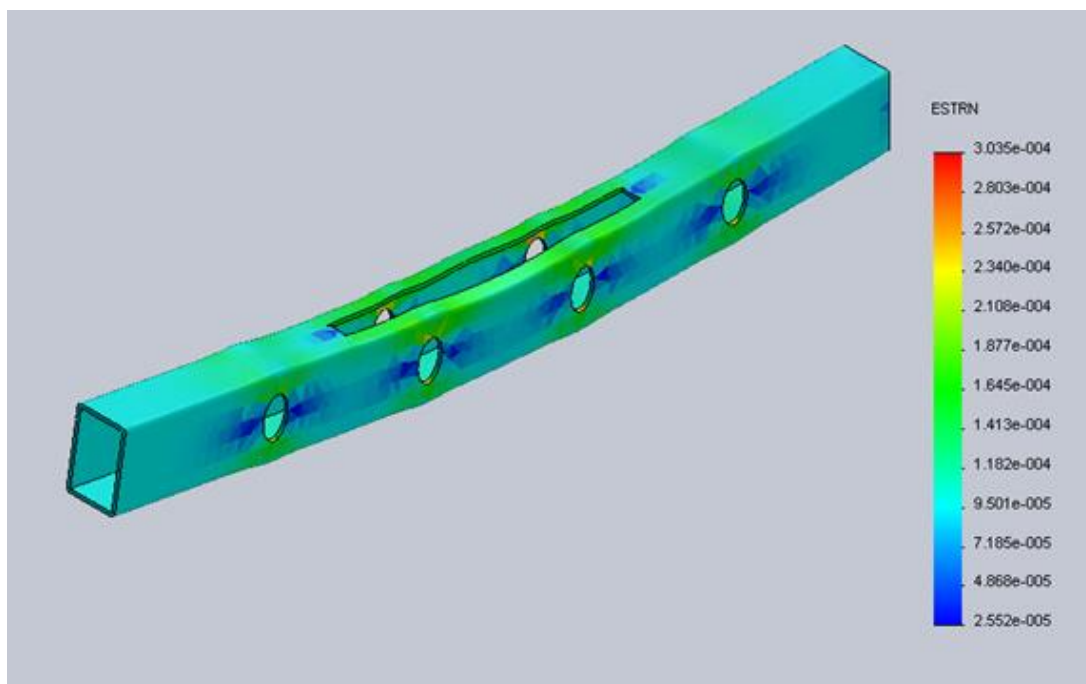


Figura 5.10 – Campo de deformação da carcaça.

Pode-se observar, também, a deformação e deslocamento máximos da carcaça de 0,14mm e 3.10^{-4} mm, respectivamente.

5.3 ESTUDO DA CARCAÇA – PERFIL TUBULAR (Figura 5.11)

Propriedades do material

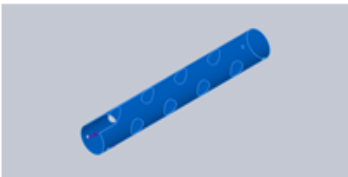
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa: 8.54075 kg Volume: 0.00108111 m³ Densidade: 7900 kg/m³ Peso: 83.6993 N </p>	<p> Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.29 Massa específica: 7900 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.7e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.5e-005 /Kelvin </p>	<p>Corpo sólido 1(Corte-extrusão3)(CARCAÇA 01)</p>
Dados da curva: N/A		

Figura 5.11 – Dados da carcaça – tubular.

As figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam as análises das tensões de von Mises, fator de segurança, deslocamento e deformação para a carcaça com o perfil tubular.

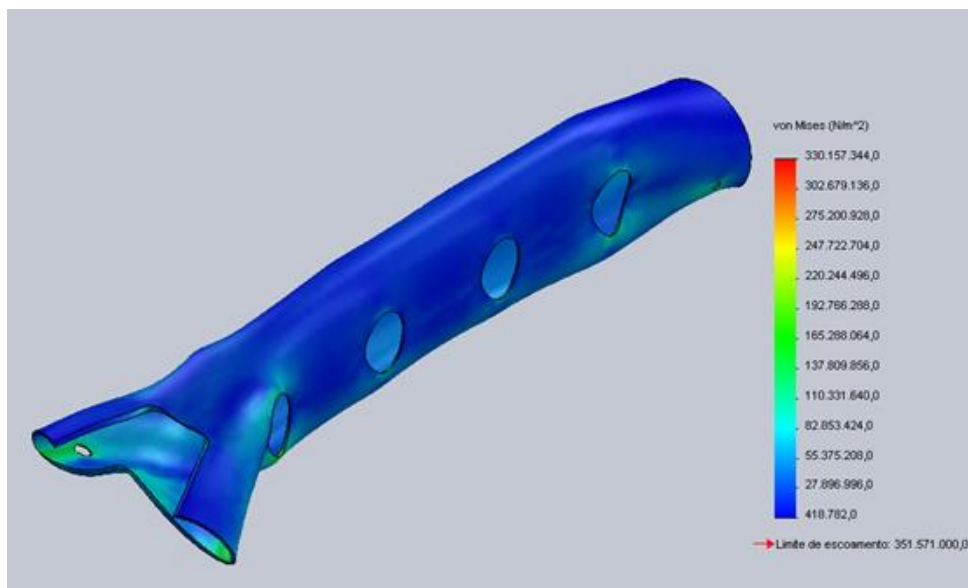


Figura 5.12 – Campo de tensões atuantes na carcaça tubular.

Verificou-se então que a tensão máxima de aproximadamente 330,16MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 350MPa aproximadamente, gerando um fator de segurança de 1,06.

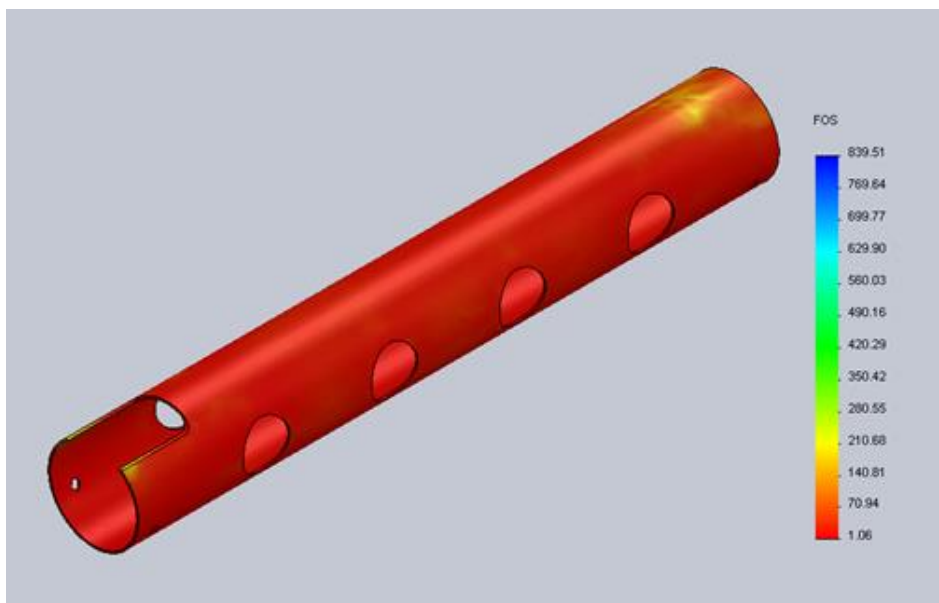


Figura 5.13 –Fator de segurança atuante na carcaça tubular.

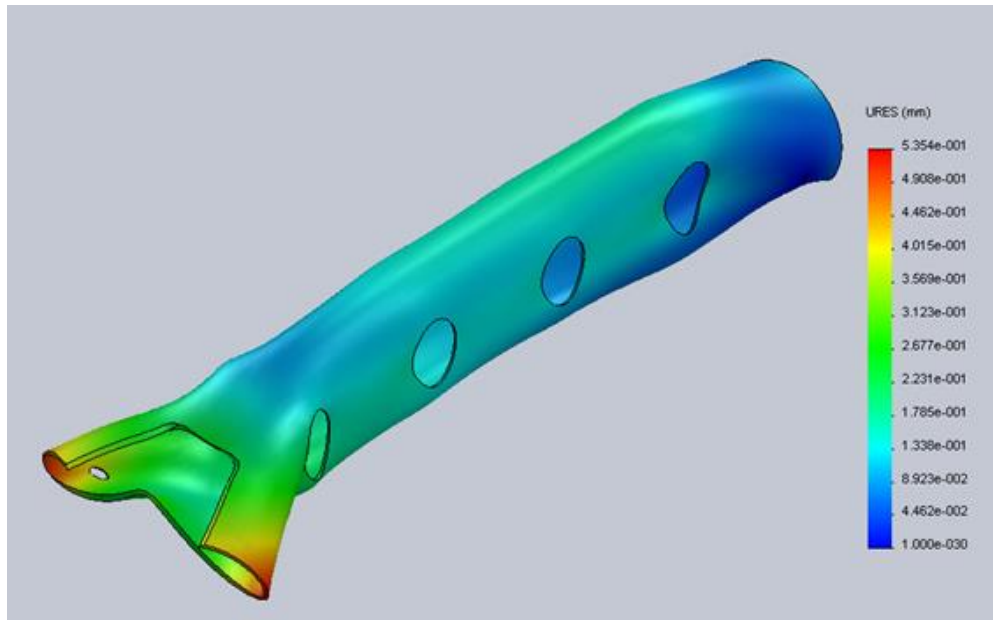


Figura 5.14 – Campo de deslocamento da carcaça tubular.

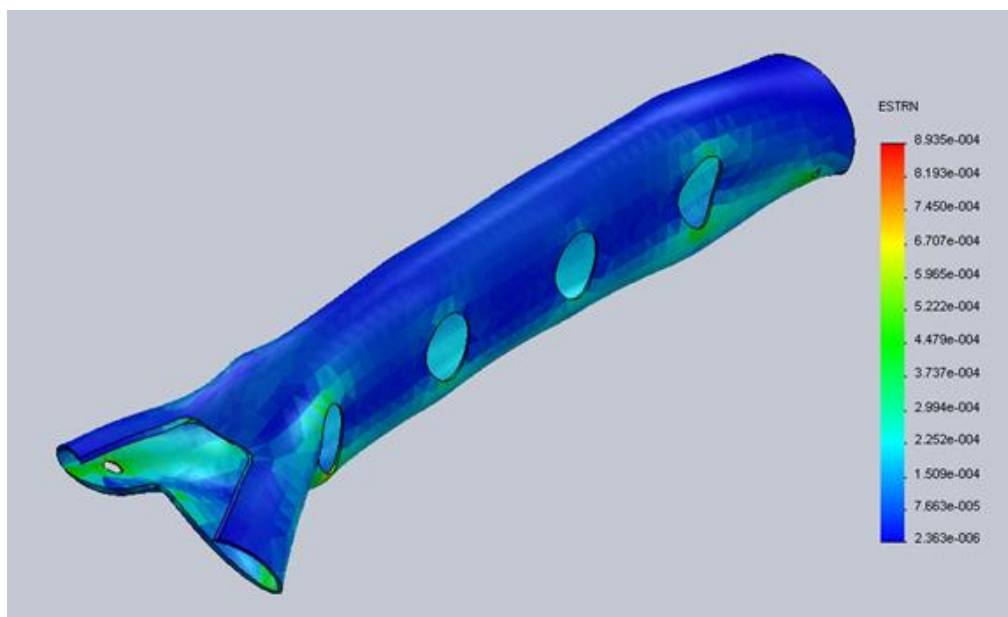


Figura 5.15 – Campo de deformação da carcaça tubular.

Desta forma, além de obter um fator de segurança maior, a carcaça de perfil retangular permite uma melhor fixação dos componentes em suas extremidades, além de ter um peso quase 40% menor, sendo este, portanto o perfil da carcaça adotado para este projeto.

Foi também realizado um estudo da carcaça com aço inoxidável AISI-321, tendo em vista que a ideia do dispositivo é, quando em operação, trabalhar nas mais diversas situações climáticas. Desta forma, tem-se as seguintes análises:

5.4 ESTUDO DA CARCAÇA – AÇO INOX (Figura 5.16)

Propriedades do material

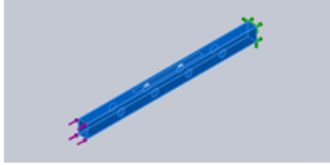
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa:3.27042 kg Volume:0.000408803 m³ Densidade:8000 kg/m³ Peso:32.0502 N </p>	<p>Nome: AISI 321 Aço inoxidável recozido (SS)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico</p> <p>Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima</p> <p>Limite de escoamento: 2.34422e+008 N/m²</p> <p>Resistência à tração: 6.2e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 1.93e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.27</p> <p>Massa específica: 8000 kg/m³</p> <p>Coefficiente de expansão térmica: 1.7e-005 /Kelvin</p>	Corpo sólido 1(Corte-extrusão2)(Carcaça 2)
Dados da curva:N/A		

Figura 5.16 – Dados da carcaça – AÇO INOX.

As figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam as análises das tensões de von Mises, fator de segurança, deslocamento e deformação para a carcaça com aço inox.

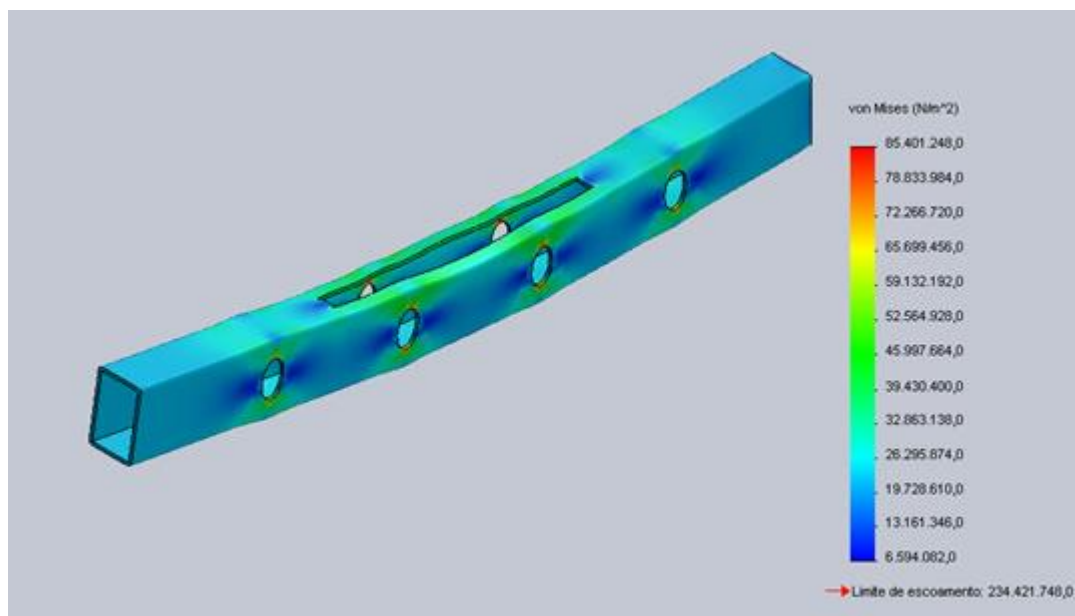


Figura 5.17 – Campo de tensões atuantes na carcaça.

Verificou-se então que a tensão máxima de aproximadamente 85,4MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 350MPa aproximadamente, gerando assim um fator de segurança de 4,12.

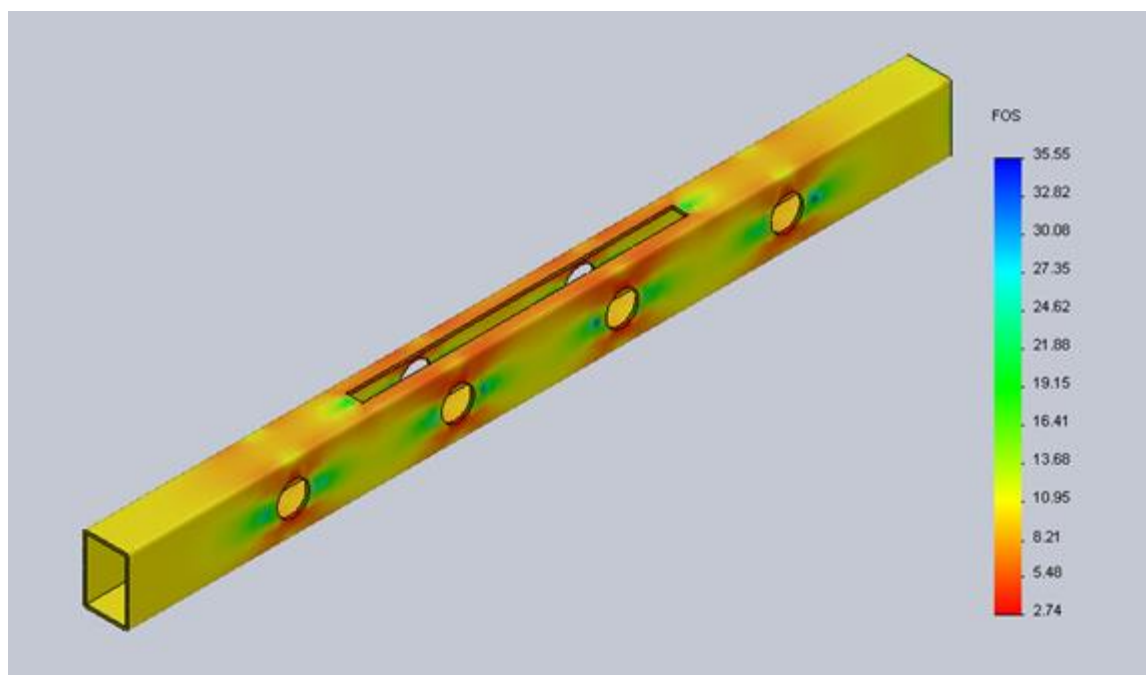


Figura 5.18 – Fator de segurança atuantes na carcaça.

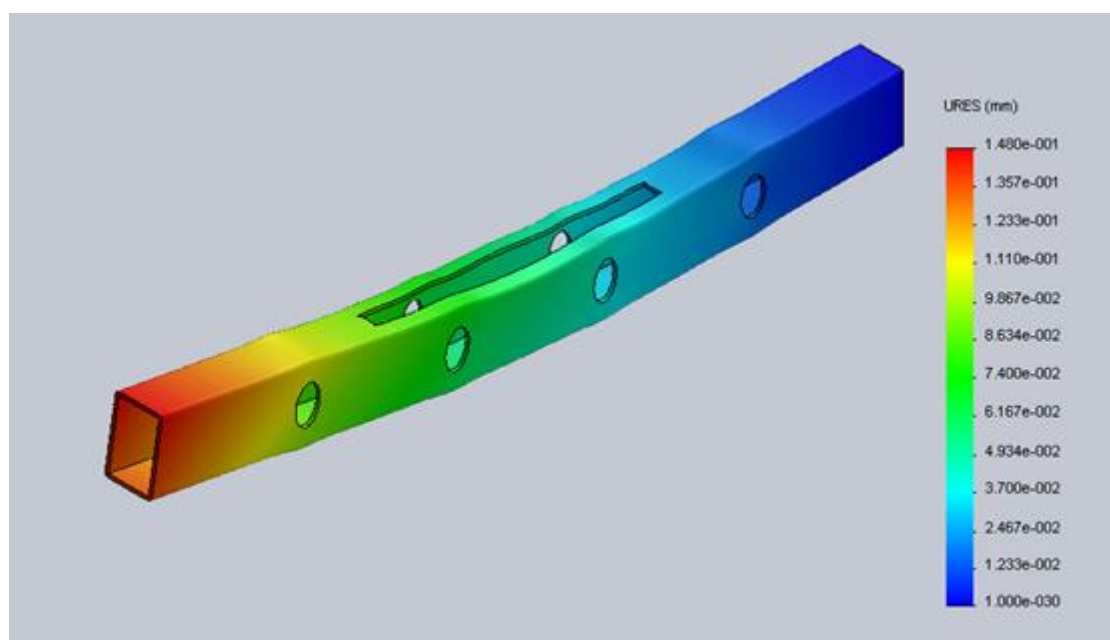


Figura 5.19 – Campo de deslocamento da carcaça.

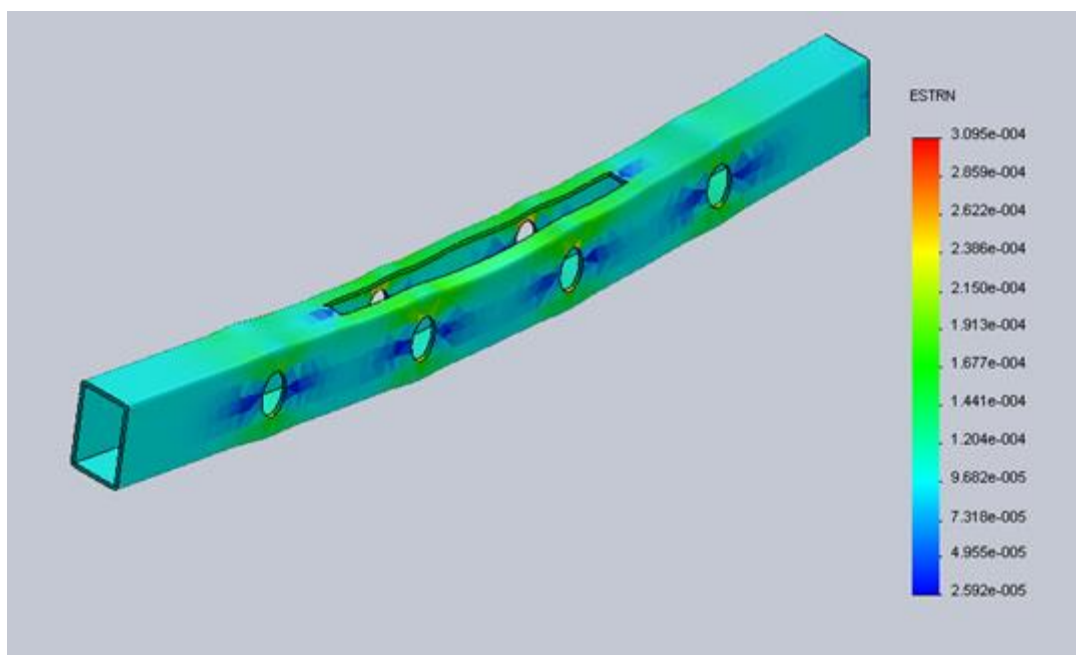


Figura 5.20 – Campo de deformação da carcaça.

5.5 ESTUDO DOS SUPORTES DA CARCAÇA (Figura 5.21)

Propriedades do material

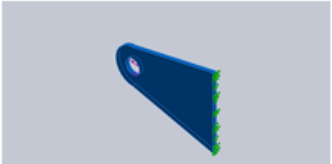
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa: 0.0838632 kg Volume: 1.06156e-005 m³ Densidade: 7900 kg/m³ Peso: 0.821859 N </p>	<p> Nome: AISI 1020 Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 3.51571e+008 N/m² Resistência à tração: 4.20507e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.29 Massa específica: 7900 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.7e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.5e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1 (Corte-extrusão1) (Suporte Carcaça)
Dados da curva: N/A		

Figura 5.21 – Dados do suporte da carcaça.

As figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 apresentam as análises das tensões de von Mises, fator de segurança, deslocamento e deformação para os suportes da carcaça.

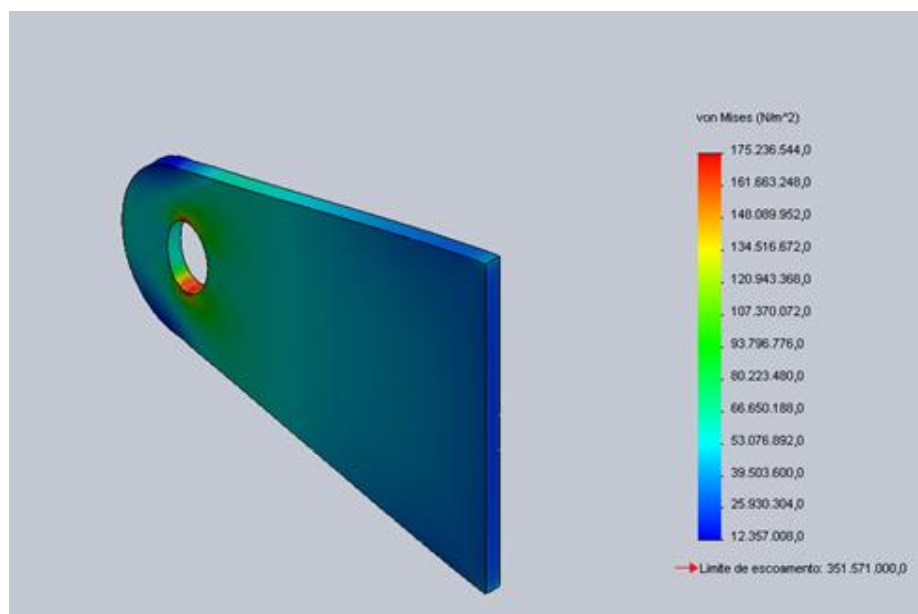


Figura 5.22 – Campo de tensões atuantes no suporte da carcaça.

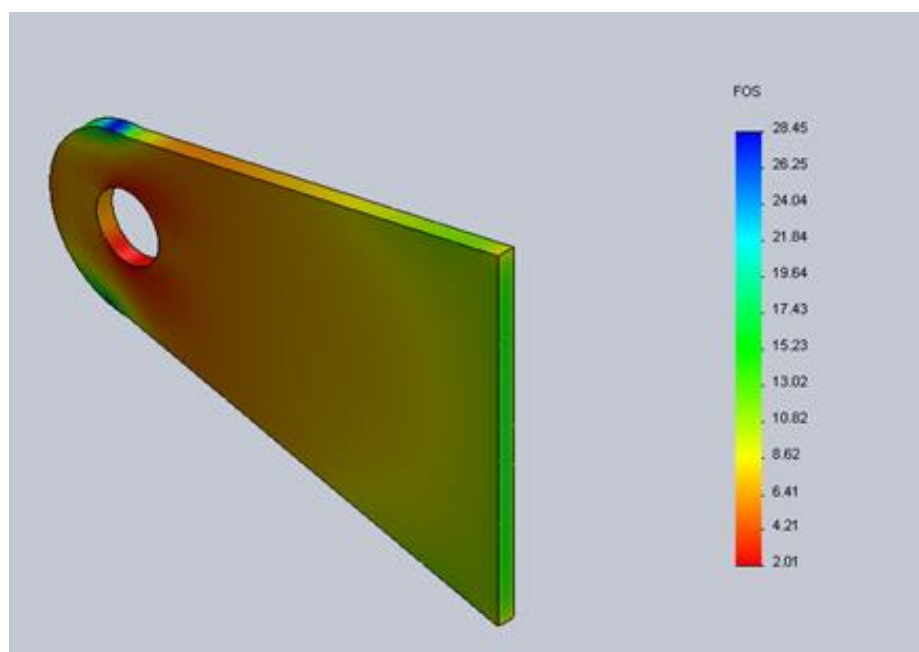


Figura 5.23 –Fator de segurança atuante no suporte da carcaça.

Verificou-se então a tensão máxima de aproximadamente 175MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento como mostrado a figura de 350MPa aproximadamente, gerando assim no estudo seguinte um fator de segurança de 2,01.

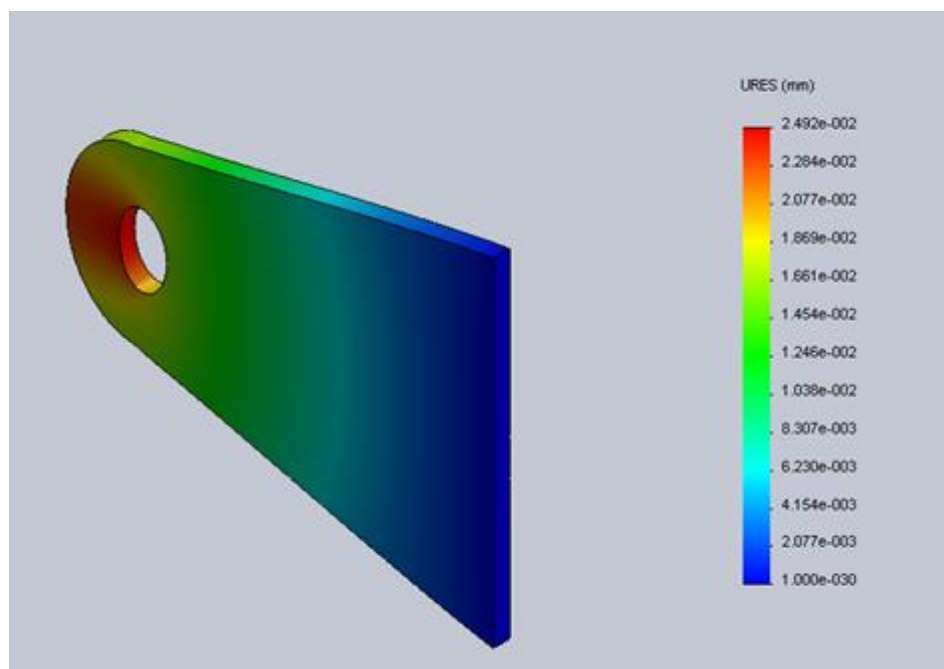


Figura 5.24 – Campo de deslocamento do suporte da carcaça.

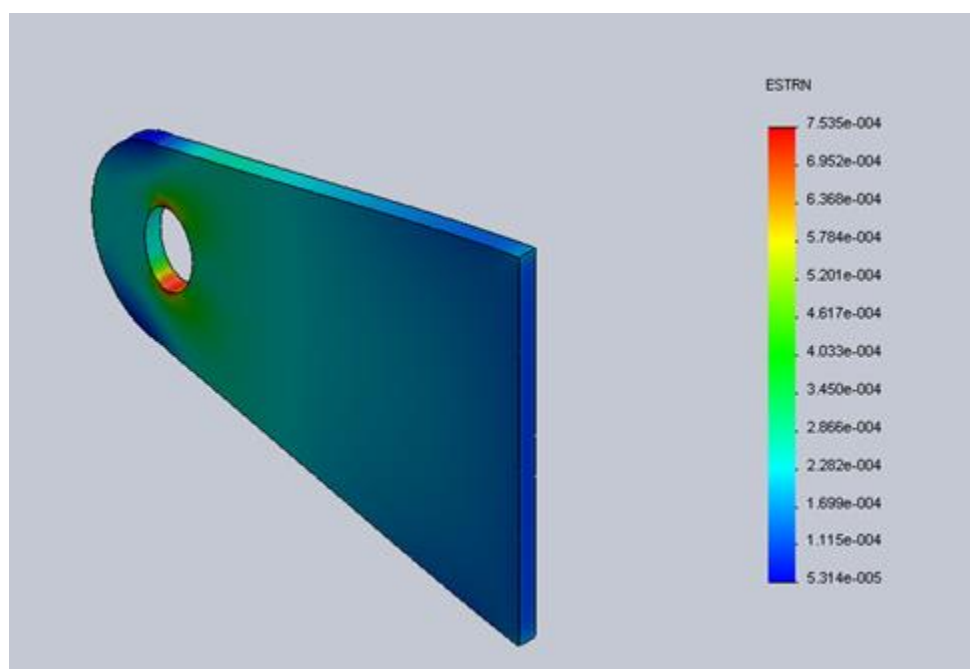


Figura 5.25 – Campo de deformação do suporte da carcaça.

5.6 ESTUDO DOS PINOS DE FIXAÇÃO (Figura 5.26, 5.27 e 5.28)

Propriedades do material

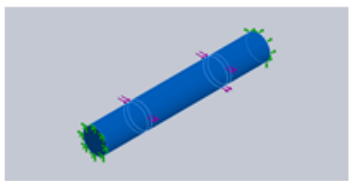
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa:0.0692042 kg Volume:8.87233e-006 m³ Densidade:7800 kg/m³ Peso:0.678201 N </p>	<p> Nome: Aço carbono fundido Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 2.48168e+008 N/m² Resistência à tração: 4.82549e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.32 Massa específica: 7800 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.6e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.2e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1(Corte-extrusão4)(PINO FIXAÇÃO BASE F_APLIC)
Dados da curva:N/A		

Figura 5.26 – Dados do pino de fixação da base do braço de alavanca.

Propriedades do material

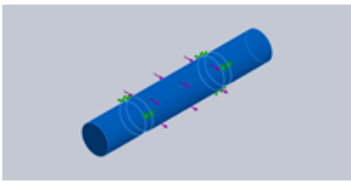
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa:0.0182212 kg Volume:2.33606e-006 m³ Densidade:7800 kg/m³ Peso:0.178568 N </p>	<p> Nome: Aço carbono fundido Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 2.48168e+008 N/m² Resistência à tração: 4.82549e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.32 Massa específica: 7800 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.6e+010 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1.2e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1(Corte-extrusão4)(PINO TOPO E CENTRO F_APLICADA)
Dados da curva:N/A		

Figura 5.27 –Dados do pino de fixação intermediário do braço de alavanca.

Propriedades do material

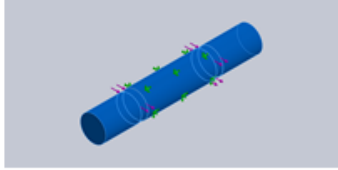
Referência do modelo	Propriedades	Componentes
 <p> Massa:0.0182212 kg Volume:2.33606e-006 m³ Densidade:7800 kg/m³ Peso:0.178568 N </p>	<p> Nome: Aço carbono fundido Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima Limite de escoamento: 2.48168e+008 N/m² Resistência à tração: 4.82549e+008 N/m² Módulo elástico: 2e+011 N/m² Coefficiente de Poisson: 0.32 Massa específica: 7800 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7.6e+010 N/m² Coefficiente de expansão térmica: 1.2e-005 /Kelvin </p>	Corpo sólido 1.(Corte-extrusão4)(PINO TOPO E CENTRO F_APLICADA)
Dados da curva:N/A		

Figura 5.28 – Análise do pino de fixação superior do braço de alavanca.

Abaixo são apresentadas as análises das tensões de von Mises, bem como o fator de segurança para os pinos utilizados no braço de alavanca, onde os pinos da base, que fixam as extremidades ao braço de alavanca em um extremidade e ao condutor na outra extremidade tem diâmetro de 12mm e os pinos do braço de alavanca, um localizado na parte superior, que fazem a ligação com a outra extremidade do cabo condutor, e o outro na parte intermediária do braço de alavanca, com 8mm de diâmetro.

As figuras 5.24, 5.25 apresentam as análises, da tensão de von Mises e fator de segurança, respectivamente, do pino localizado na base do braço de alavanca.

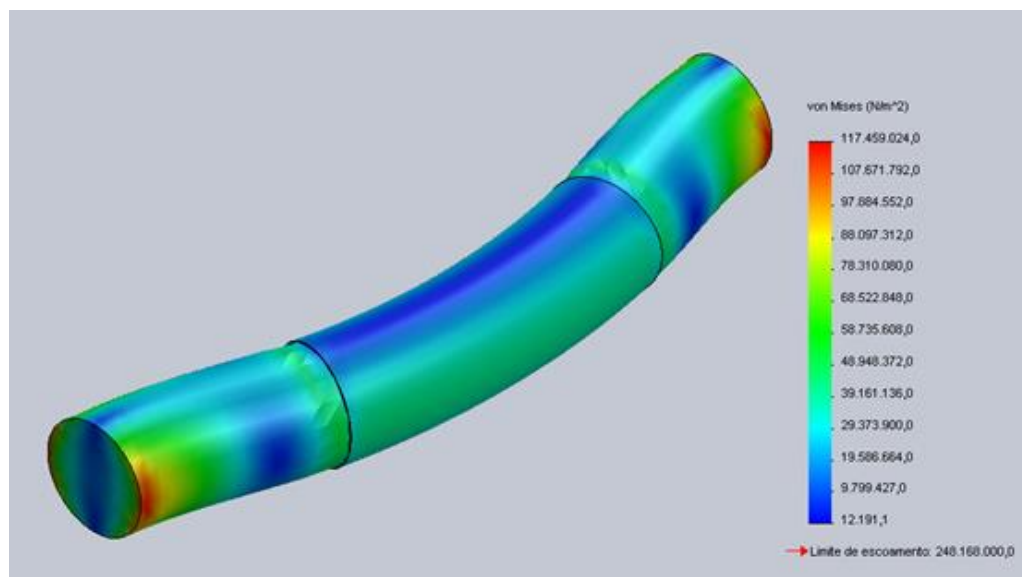


Figura 5.29 – Campo de tensões atuantes no pino da base do braço de alavanca.

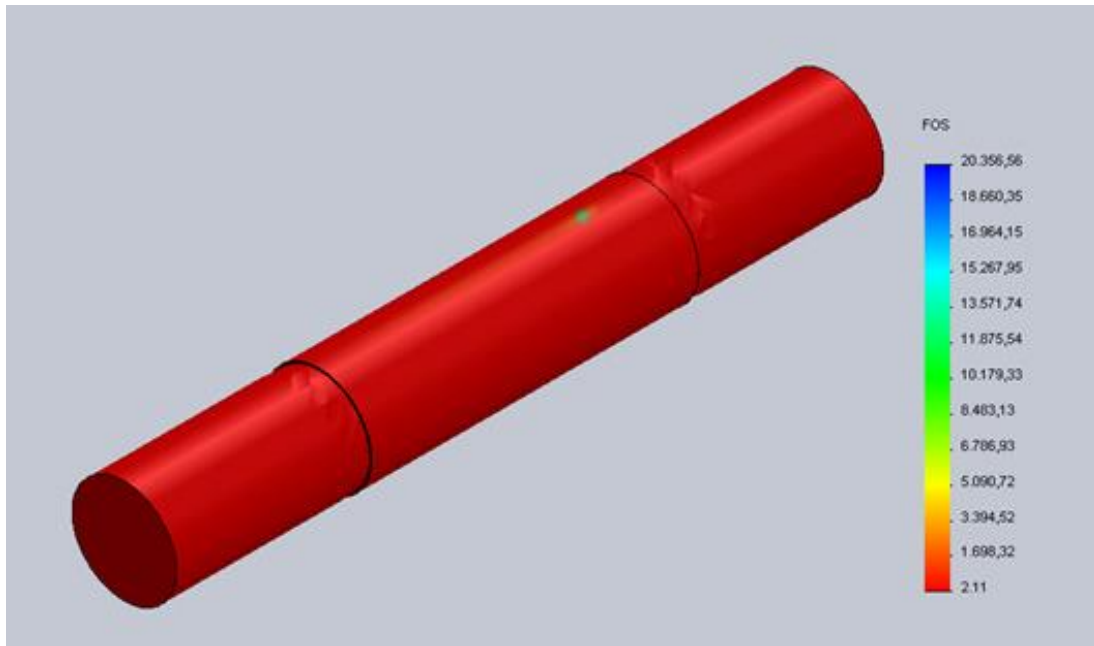


Figura 5.30 –Fator de segurança do pino da base do braço de alavanca.

Verificou-se então a tensão máxima de aproximadamente 117,5MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 250MPa aproximadamente, gerando um fator de segurança de 2,11.

As figuras 5.26 e 5.27 apresentam as análises, da tensão de von Mises e fator de segurança, respectivamente, do pino intermediário do braço de alavanca.

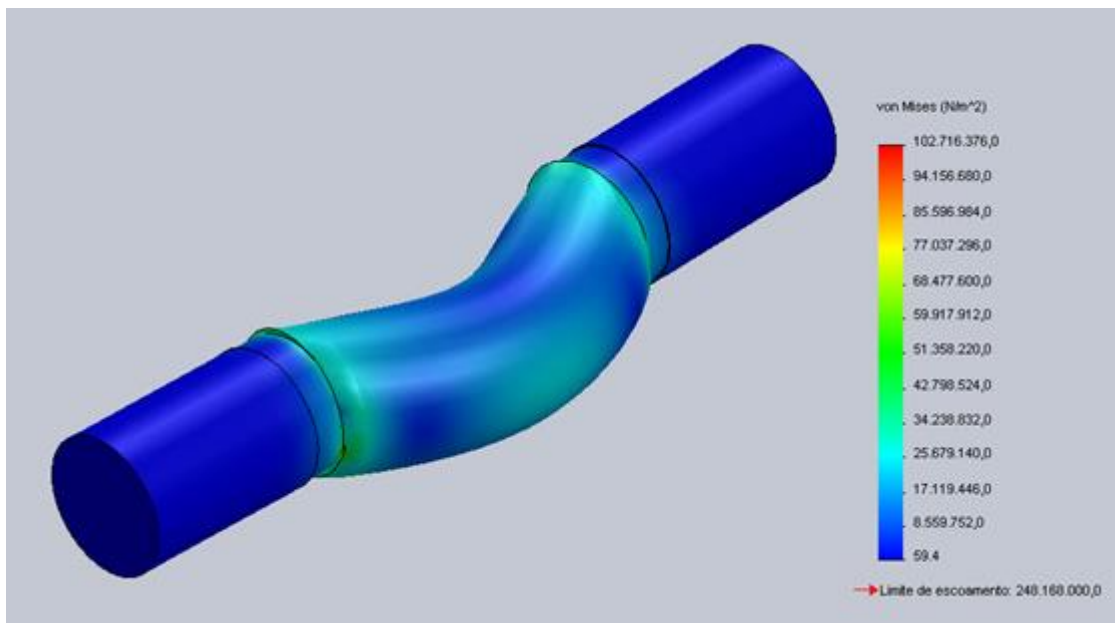


Figura 5.31 – Campo de tensões atuantes no pino intermediário do braço de alavanca.

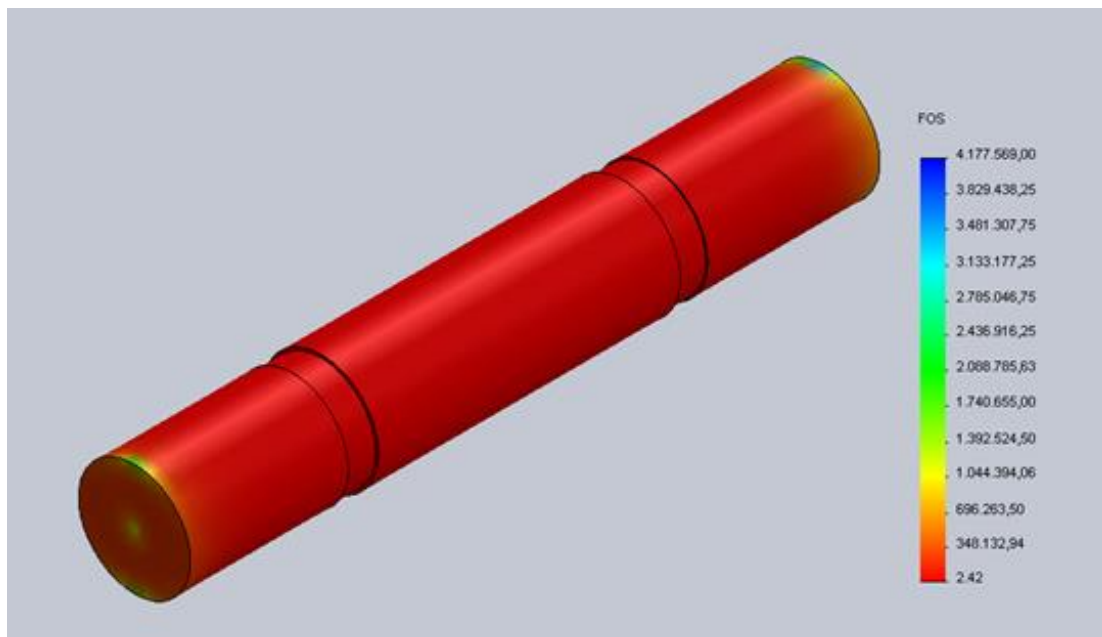


Figura 5.32 – Fator de segurança do pino intermediário do braço de alavanca.

Verificou-se então a tensão máxima de aproximadamente 103MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 250MPa aproximadamente, gerando assim um fator de segurança de 2,42.

As figuras 5.28 e 5.29 apresentam as análises, da tensão de von Mises e fator de segurança, respectivamente, do pino superior do braço de alavanca.

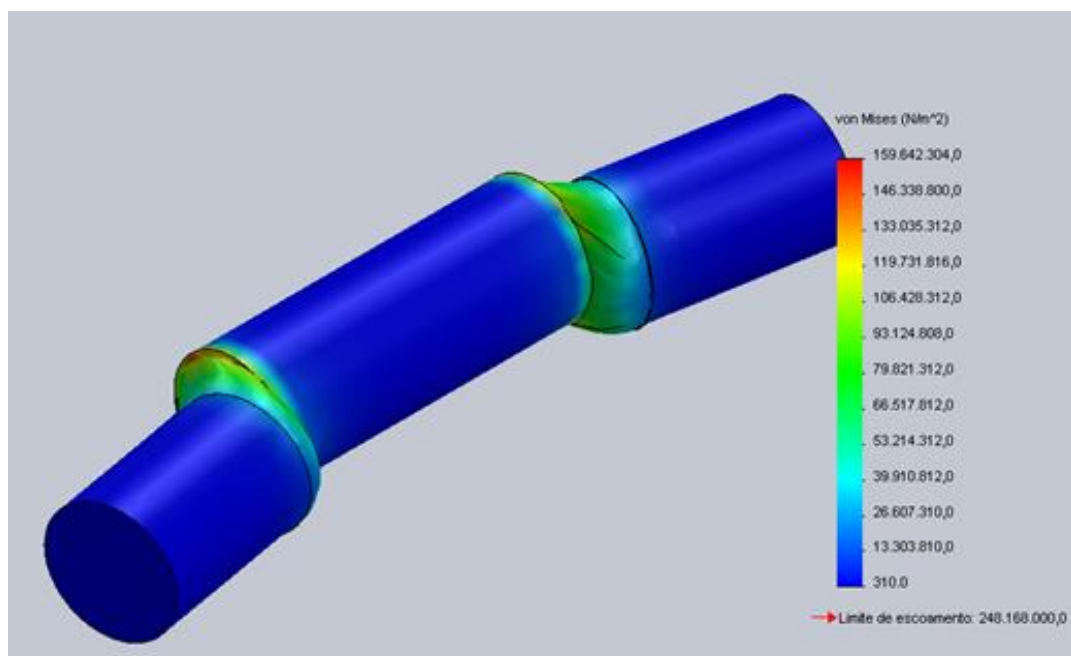


Figura 5.33 – Campo de tensões atuantes no pino superior do braço de alavanca.

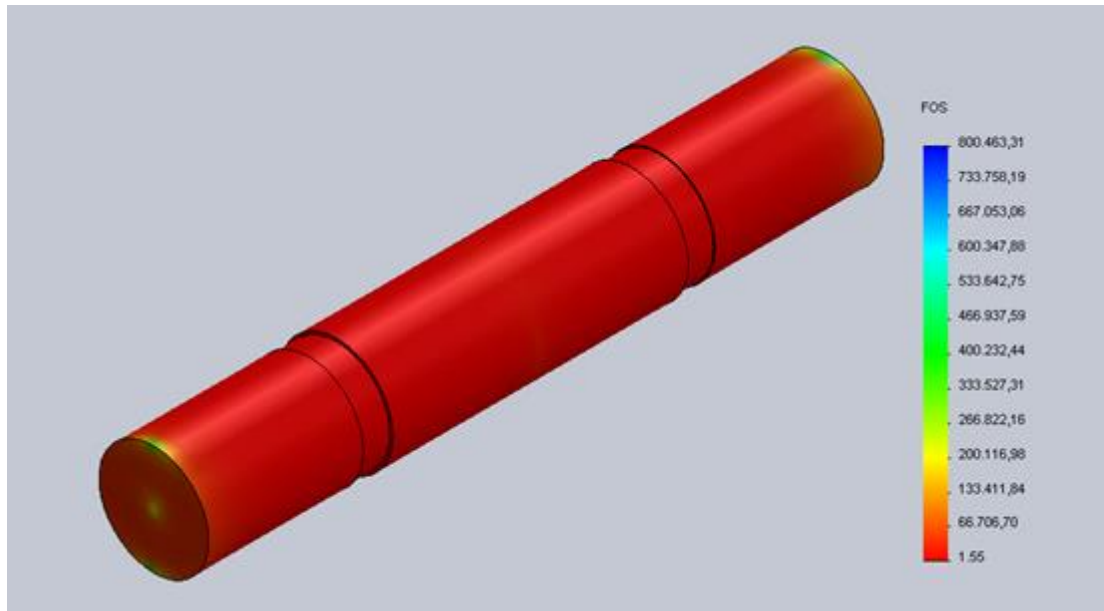


Figura 5.34 – Fator de segurança atuante no pino superior do braço de alavanca.

Verificou-se então a tensão máxima de aproximadamente 160MPa, sendo, portanto menor que o limite de escoamento de 250MPa aproximadamente, gerando um fator de segurança de 1,55.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou, a partir da concepção do SLiM, um modelo de um dispositivo adaptativo mitigador de flecha. O dispositivo é capaz de retracionar cabos condutores em linhas de transmissão elétrica através de um atuador composto por fios de SMA (ligas com memória de forma) que respondem a variação de carga e de temperatura com a finalidade de reduzir flechas excessivas, causadoras de sérios problemas relacionados a segurança e limitações na capacidade de transmissão de energia elétrica.

Foram determinados, a partir das equações de projetos de LT, alguns comprimentos de flechas e de condutores em função de temperaturas pré-estabelecidas onde, posteriormente, foi fixada uma flecha limite que propositalmente foi infringida, com o aumento da temperatura, a fim de identificar uma flecha excessiva, e após sofrer ação do dispositivo, pode-se observar aproximadamente 6,5% de redução de flecha. Também foi verificada a necessidade de 28 fios de SMA para compor o atuador, determinado em função das propriedades da liga NiTi e da tensão de pré-carregamento (EDS) aplicada nas extremidades do dispositivo.

Finalmente, foi observado a funcionalidade do dispositivo através de um estudo realizado para uma situação típica, onde determinou-se a geometria do dispositivo, possibilitando a análise por elementos finitos a fim de verificar a resistência mecânica dos componentes.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA ATIVIDADES FUTURAS

Para que o dispositivo seja produzido e adotado futuramente para produção, será necessário o desenvolvimento de um protótipo do dispositivo e os testes de funcionalidade em laboratório, tais como, testes mecânicos, elétricos e térmicos e posteriormente realizá-los em campo.

Visando uma futura produção em escala do dispositivo, a publicação de artigos científicos em congressos e fóruns para enfatizar a funcionalidade do dispositivo, bem como parcerias com grandes fabricantes e fornecedores podem beneficiar a introdução do dispositivo no mercado.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AERNOUDT, J. Van Humbeeck, L. Delaey and W. Van Moorlegheem, in: **The Science and Technology of Shape Memory Alloys**, Ed. V. Torra (Impresrapit, Barcelona, 1987) p.221., 1987.

ALUBAR: “**Catálogo Técnico: Condutores elétricos de alumínio**”. Disponível em <http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/catalogo_tecnico_2010-2.pdf>. Acesso em: 03/03/2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**”. Rio de Janeiro, 1985.

BATRA, A., “**Shape Memory Alloys An Introduction**”. Seminar Report, Roll No 97D01002, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 1999.

BURIN, F.S., “**Modelagem do Comportamento Mecânico de Cabos suspensos Através de Métodos Analíticos e Numéricos**”, Trabalho de Diplomação, Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 74p. 2010.

DA SILVA, E.P., “**Aplicações de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas**”. Série Arquimedes, Vol.2, Anais de DINCON 2003, pp. 2358-2387. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SP, 2003.

DA SILVA, N.M., “**Análise de um sistema de mitigação de catenária em linhas de transmissão de energia elétrica baseado em ligas com memória de forma**”. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, UnB, Brasília, DF, 2012.

DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., WARLIMONT, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 1: Structural and Microstructural Changes Associated With the Transformations**”. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1521-1535.

FECHOMETAL : “**Catálogo Técnico: Especificações técnicas para aço inox**”. Disponível em <<http://www.fechometal.com/docs/Especificacao%20para%20Fitas.pdf>> Acesso em: 13/07/2013

FUCHS, R.D., ALMEIDA, M.T, “**Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**”, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, pp. 1-11., 1982.

KRISHNAN, R. V., DELAEY, L., TAS, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 2: The Macroscopic Mechanical Behaviour**”. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1536-1544.

LÜSSI, K.M., “**A Study and Implementation Analysis of An Anti-Sagging Device for Power Transmission Lines Using Shape Memory Alloys**”, Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of KwaZulu-Natal, KwaZulu-Natal, South Africa, 147p. 2009.

OTSUKA, K., WAYMAN, C. M., “**Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity**”. Cambridge University Press, Cambridge, 1998, p. 27-48.

POWER LINE SYSTEMS Inc., 2008, “**User Manual: PLS-CADD version 9**”, Madisson USA.

SANTO ANTONIO ENERGIA S/A: “**Um dos maiores sistemas de transmissão do mundo**”. Disponível em <http://www.santoantonioenergia.com.br/site/portal_mesa/pt/energia/transmissao/transmissao.aspx>. Acesso em: 01/03/2013

SHAW, J . A.; KYRIAKIDES, S. **Thermomechanical aspects of Ni-Ti**. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43 (8): pp. 1243-1281, 1995.

SHIRMOHAMADI, M., “**Sagging Line Mitigator Final Report**”. California Energy Commission, Berkeley, CA, 2002.

SIDERAÇO: “**Catálogo técnico: Aços Inoxidáveis**”. Disponível em <http://www.sideracofitas.com.br/userfiles/file/acos_inox_propriedades_equivalencia_normas.pdf>. Acesso em 13/07/2013.

WARLIMONT, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated With Martensitic Transformations – Part 3: Thermodynamics and Kinetics**”. *Journal of Materials Science*, 9: pp. 1545-1555, 1974.

PROGRAMA MATLAB – IMPLEMENTAÇÃO PARA O CÁLCULO DAS MEDIDAS DO DISPOSITIVO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO BRAÇO DE ALAVANCA DO SLiM

```

%% PROGRAMA PARA O CÁLCULO DAS MEDIDAS DO SLiM EM FUNÇÃO DO BRAÇO DE
ALAVANCA

                                PROJETO DE GRADUAÇÃO

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                                SLiM - Sagging Line Mitigator
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all; close all; clc

%% Condições de Contorno

a= 400 ;                                %Vão[m]
C= 1636.5;                             %Parâmetro de catenária[m]
t0=15;                                  %Temperatura ambiente[°C]
t1=50;                                  %Temperatura Máxima Admissível p/ "L" [°C]
t2=70;                                  %Temperatura Máxima de operação [°C]
alfa= (18.25)*10^(-6);                  %Coeficiente de dilatação térmica do condutor[1/°C]
Esma=0.08;                              %Deformação típica para SMA
phi= (2*(pi/3));                        %Ângulo máximo entre a alavanca(c) e a
carcaça(r) [rad]
beta= pi/3;                             %Ângulo mínimo entre a alavanca(c) e a
carcaça(r) [rad]
Lf=0.93845                              %Comprimento do condutor na condição fria[m]

%%
% Cálculo de flecha
f=(a^2)/(8*C);                          % [m]

%%
%Comprimento do cabo condutor
L = a+[(8*f^2)/(3*a)];                  % [m]

%%
%Comprimento em função da temperatura
L_1= L +[L*alfa*(t1-t0)];               %Ladm
L_2= L +[L*alfa*(t2-t0)];               %Lsup

%%
%Determinação do limite de flecha

f_lim=sqrt(3*a*((L_1-a)/8));             %FLECHA LIMITE (ADMISSÍVEL) [m]

%Determinação da flecha máxima de operação e flecha de violação

f_max=sqrt(3*a*((L_2-a)/8));             %FLECHA MÁXIMA DE OPERAÇÃO [m]

```

```

f_viola=f_max - f_lim;           %[m] - FLECHA DE VIOLAÇÃO [m]

%%
%Variação do Comprimento efetivo do SLiM

L_adm = L_1;                      %[m]
L_sup = L_2;                      %[m]

Lq = Lf*(1-Esma)                  %[m]

delta_Lsma = Esma*Lf              %[m]

%%
%Ação efetiva e Dimensionamento do SLiM

delta_SLiM = L_sup - L_adm        %[m]

%Braço de Alavanca

c = delta_SLiM/(phi/2)            %[m]

s = delta_Lsma/(phi/2)            %[m]

%%
%Fator de amplificação

n = delta_SLiM/delta_Lsma

%%
%Determinação da carcaça(r) e do cabo de segurança(d)

%>>>ABERTO - FRIO
% 1ªEQUAÇÃO => Lf^2=(r^2)+(s^2)-2*r*s*cos(phi)

%r^2 - (2*s*cos(phi))*r + (s^2 - Lf^2) = 0
a_1 = 1;
b_1 = - (2*s*cos(phi));
c_1 = (s^2 - Lf^2);
delta_1= (b_1)^2 - 4*(a_1)*(c_1);

r_1 = (- b_1 + sqrt(delta_1))/ (2*a_1)
r_2 = (- b_1 - sqrt(delta_1))/ (2*a_1)

if r_1 > r_2;
    r = r_1
else r = r_2
end

% 2ªEQUAÇÃO => d1^2 = (c^2)+(r^2)-2*c*r*cos(phi)

d1 = sqrt((c^2)+(r^2)-2*c*r*cos(phi))           %CABO DE SEGURANÇA

```



```

%>>>FECHADO - QUENTE

% 1ªEQUAÇÃO => Lq^2=(r^2)+(s^2)-2*r*s*cos(beta)

%r^2 - (2*s*cos(beta))*r + (s^2 - Lq^2) = 0

%a_2 = 1;
%b_2 = - (2*s*cos(beta));
%c_2 = (s^2 - Lq^2);
%delta_2= (b_2)^2 - 4*(a_2)*(c_2);

%r_3 = (- b_2 + sqrt(delta_2))/ (2*a_2)
%r_4 = (- b_2 - sqrt(delta_2))/ (2*a_2)

% 2ªEQUAÇÃO => d2^2=(c^2)+(r^2)-2*c*r*cos(beta)
%r^2 - (2*c*cos(beta))*r + (c^2 - d2^2)=0

d2 = sqrt((c^2)+(r^2)-2*c*r*cos(beta))

```